

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

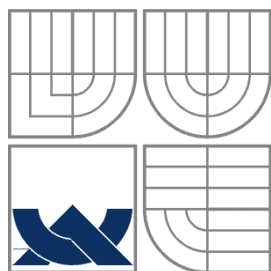
FLÍČKOVÁ ANTÉNA S PŘEPÍNATELNOU POLARIZACÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

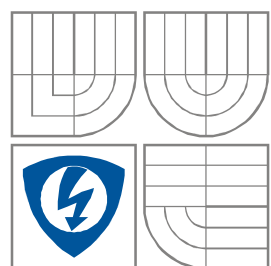
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MICHAL HAVELKA

BRNO 2009



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

FLÍČKOVÁ ANTÉNA S PŘEPÍNATELNOU POLARIZACÍ

PATCH ANTENNA WITH SWITCHABLE POLARIZATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MICHAL HAVELKA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Dr. Ing. ZBYNĚK RAIDA

BRNO, 2009

LICENČNÍ SMLOUVA

POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Michal Havelka
Bytem: Družstevní 102, Pardubice 53009
Narozen/a (datum a místo): 6. února 1986 v Pardubicích

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
se sídlem Údolní 53, Brno, 602 00
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:
prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida, předseda rady oboru Elektronika a sdělovací technika
(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1

Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- ☐ disertační práce
- ☐ diplomová práce
- ☒ bakalářská práce
- ☐ jiná práce, jejíž druh je specifikován jako
(dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Flíčková anténa s přepínatelnou polarizací

Vedoucí/ školitel VŠKP: prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida.

Ústav: Ústav radioelektroniky

Datum obhajoby VŠKP: _____

VŠKP odevzdal autor nabyvateli*:

- ☒ v tištěné formě – počet exemplářů: 2
- ☒ v elektronické formě – počet exemplářů: 2

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.

3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.

4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

* hodící se zaškrtněte

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ☒ ihned po uzavření této smlouvy
 - ☐ 1 rok po uzavření této smlouvy
 - ☐ 3 roky po uzavření této smlouvy
 - ☐ 5 let po uzavření této smlouvy
 - ☐ 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

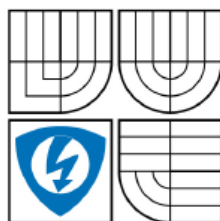
V Brně dne: 5. června 2009

.....

Nabyvatel

.....

Autor



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Michal Havelka
Ročník: 3

ID: 78230
Akademický rok: 2008/2009

NÁZEV TÉMATU:

Flíčková anténa s přepínatelnou polarizací

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se se základními typy planárních antén, s metodami jejich návrhu, optimalizace a modelování v programu ANSOFT Designer. Vytvořte model jednoduché planární antény pro pásmo 2,45 GHz s možností přepínat mezi horizontální a vertikální polarizací.

Model antény doplňte PIN diodami. Detailně porovnejte vlastnosti antén s diodami a bez diod. Diskutujte výhody a nevýhody obou řešení. Pokuste se o experimentální ověření vlastností antény.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] BALANIS, C. A. Antenna Theory: Analysis and Design, 3rd Edition. New York: J. Wiley and Sons, 2005.

[2] CHEN, R.H., ROW, J.S. Single-fed microstrip patch antenna with switchable polarization. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2008, vol. 56, no. 4, p. 922-926.

Termín zadání: 9.2.2009

Termín odevzdání: 5.6.2009

Vedoucí práce: prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá rozbořem základních typů planárních antén, metod jejich návrhu, optimalizací a modelováním v programu ANSOFT Designer. Důraz je kladen na návrh planárních antén s aperturovým buzením. Nejprve je popsán návrh flíčkové antény s jednoduchou šterbinou, následuje návrh flíčkové antény s kruhovou šterbinou. Obě antény jsou určeny pro pásmo 2,45 GHz.

Druhá část je věnována anténě s přepínatelnou polarizací. Pomocí tří PIN diod, napájených 3-V lithiovou baterií, je umožněno přepínat lineární (horizontální a vertikální) a kruhovou polarizaci (pravotočivou a levotočivou). Výsledky byly ověřeny experimentálním ověřením.

Klíčová slova:

Planární anténa, aperturové buzení, přepínání polarizace, lineární polarizace, kruhová polarizace Ansoft Designer.

Abstrakt

The bachelor's thesis deals with the analysis of basic planar antennas, the design methods, optimization and simulation in ANSOFT Designer. Attention is turned to the design of aperture coupled microstrip antennas. First, the antenna with a simple slot is designed. Second, the design of the ring slot coupled microstrip antenna is described. Both the antennas are designed for the operation frequency 2,45 GHz.

The second part is devoted to the antenna with switchable polarization. Using three PIN diodes powered by lithium battery of 3-V, the linear polarization (both the horizontal one and the vertical one) and the circular polarization (both the right-hand one and the left-hand one) can be switched. The results were verified by experimental verification.

Key words:

Planar antenna, aperture coupling, switchable polarization, linear polarization, circular polarization, Ansoft Designer.

Bibliografická citace:

HAVELKA, M. *Flíčková anténa s přepínatelnou polarizací*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 65 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Flíčková anténa s přepínatelnou polarizací jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 5. června 2009

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce prof. Dr. Ing. Zbyňku Raidovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne 5. června 2009

.....
podpis autora

Obsah

1 Úvod.....	10
2 Mikropáskové antény.....	11
2.1 Flíčková anténa	11
2.2 Aperturově napájená anténa	12
2.3 Flíčková anténa s přepínatelnou polarizací	13
3 Modelování antén v programu Ansoft Designer	14
4 Návrh aperturově buzené antény.....	16
4.1 Teoretický návrh	16
4.2 Návrh modelu v programu Ansoft Designer	16
4.3 Výsledek analýzy aperturově buzené antény	18
4.4 Vliv změny rozměrů na vlastnosti antény	19
5 Návrh antény s kruhovou štěrbinou	23
5.1 Teoretický návrh	23
5.2 Návrh modelu v programu Ansoft Designer	24
5.3 Výsledek analýzy antény s kruhovou štěrbinou	26
5.4 Vliv změny rozměrů na vlastnosti antény	26
6 Návrh antény s přepínatelnou polarizací.....	29
6.1 Teoretický návrh	29
6.2 Návrh modelu v programu Ansoft Designer	30
6.3 Vliv PIN diod na vlastnosti antény	33
6.4. Výsledky analýzy	33
6.5 Výsledky analýzy optimalizovaného modelu	35
7 Experimentální ověření.....	40
7.1 Měření činitele odrazu s_{11}	41
7.2 Měření směrových charakteristik	44
8 Porovnání výsledků	49
8.1. Činitel odrazu s_{11}	49
8.2. Směrové charakteristiky	52

9 Závěr.....	55
10 Literatura.....	57
11 Seznam zkratek a symbolů.....	58
12 Seznam obrázků	59
13 Přílohy	62
Příloha 1	63

1 Úvod

V roce 1864 skotský fyzik James Clerk Maxwell objevil, že optické a elektromagnetické vlnění jsou stejné povahy a jejich popis lze vyjádřit čtyřmi rovnicemi. Tyto rovnice vysvětlují všechny známé zákonitosti elektrických a magnetických polí [1], [2].

V roce 1887 německý fyzik Heinrich Rudolf Hertz využil teorii Maxwellových rovnic v praxi. Hertzova aparatura se skládala z induktoru s jiskřištěm v jednom rohu místnosti a oscilátoru (dvou kovových koulí vzájemně vzdálených jen pětinu milimetru s připojeným kusem drátu coby anténou) ve druhém rohu. Po spuštění induktoru se objevily jiskry i na druhé aparatuře. Tím byl poprvé dokázán přenos elektrických vln bez použití vodičů. Hertz dále dokázal, že se elektromagnetické vlny mohou odrážet a lámat, a že tedy mají stejný charakter jako světlo [1], [2].

Bezdrátová komunikace má v podstatě dva otce. Tím prvním je ruský fyzik Alexander Štěpanovič Popov, který byl požádán, aby pro petrohradskou meteorologickou stanicí zkonstruoval registrátor bouřek. Ukázalo se však, že jeho „bleskojev“ reagoval nejen na blesky, ale i na umělé záblesky, krátké a dlouhé telegrafické tečky a čárky. Popovův přístroj (bleskosvod jako anténa, koherer, telegrafní relé a zvonek) byl první telegrafní stanicí, která fungovala bez „drátů“. V roce 1896 veřejně předvedl spojení mezi budovami petrohradské univerzity na vzdálenost 250 metrů pomocí symbolické depeše, vysílané v morseově abecedě. A.Š. Popov si svůj vynález nepatentoval.

Z tohoto důvodu je za otce bezdrátové komunikace považován Ital Guglielmo Marchese Marconi. V roce 1897 překonal bezdrátovou komunikací vzdálenost 5 km a byl mu vydán patent na bezdrátovou komunikaci. Popov dostal patent v roce 1900 za zdokonalení kohereru pro telegrafní signalizaci. V roce 1909 byla Marconimu udělena Nobelova cena, spolu s ním ji dostal němec Ferdinand Brown za zdokonalení bezdrátové komunikace [1], [2].

Hlavním prvkem zařízení bezdrátové komunikace je anténa. Vlastnosti bezdrátového zařízení jsou výrazně ovlivněny vlastnostmi použité antény. Kromě technických parametrů antén (zisk, směrové vlastnosti, polarizace, šířka pásma, impedanční přizpůsobení, atd.) je třeba brát v úvahu rovněž velikost antén (nízký profil), cenu výroby a nízkou hmotnost. Vhodným řešením, které je kompromisem mezi výše uvedenými protichůdnými požadavky, může být v mnoha aplikacích planární (mikropásková) anténa.

Cílem bakalářské práce je popsat základní typy planárních antén, metody jejich návrhu, optimalizace a modelování v programu ANSOFT Designer. Výsledkem by měl být model planární antény pro pásmo 2,45 GHz s možností přepínat mezi lineární (horizontální a vertikální) a kruhovou (pravotočivou a levotočivou) polarizací [9], [8].

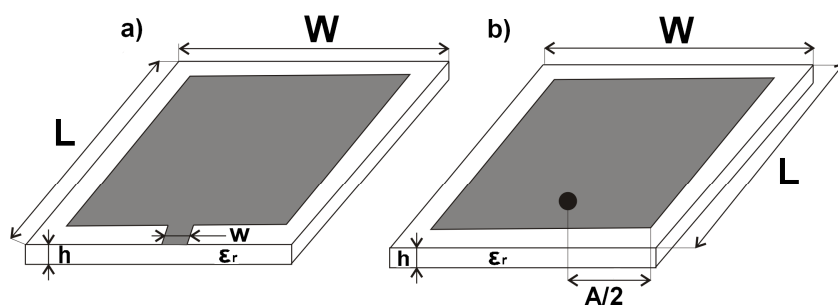
2 Mikropáskové antény

Mikropáskové antény se objevují již v roce 1953, jejich rozmach však nastal až v 70. letech, kdy byly vyrobeny vhodné substráty (materiály) pro praktické použití. V dnešní době jsou mikropáskové antény velice rozšířené. Planární antény se používají na kmitočtech od 100 MHz výše. Na nižších frekvencích by byly planární antény příliš rozměrné, neboť velikost anténního prvku typicky odpovídá polovině vlnové délky zpracovaného signálu.

Díky nízkému profilu lze planární antény snadno umístit do mobilních telefonů, na trupy letadel či karoserie automobilů. Technologie výroby planárních antén je stejná jako u tištěných spojů, z čehož plyne její ekonomická nenáročnost. Nevýhodou je úzkopásmovost a menší zisk planárních antén.

2.1 Flíčková anténa

Flíčková anténa (anglicky *patch antenna*) je nejrozšířenějším typem mikropáskových antén. Anténa je tvořena vodivým prvkem o rozměrech přibližně $\lambda/2 \times \lambda/2$, kde λ je délka vlny na dielektrickém substrátu o výšce h a permitivitě ϵ_r . Na spodní straně substrátu je nanášena vodivá vrstva, která plní funkci zemní plochy. Nejčastěji je flíčková anténa napájena mikropáskovým vedením, nebo koaxiální sondou, viz obr. 2.1 [4], [5].



Obr. 2.1 Flíčková anténa napájena: a) mikropáskem b) koaxiální sondou.

Při návrhu antény musíme vypočítat šířku W a délku L anténního prvku. Nejprve počítáme šířku flíčku W :

$$W = \sqrt{h\lambda_d} [\ln(\lambda_d/h) - 1] , \quad (2.1)$$

kde h značí výšku substrátu a λ_d značí délku vlny v substrátu:

$$\lambda_d = \frac{c}{f_r \sqrt{\epsilon_r}} . \quad (2.2)$$

Zde f_r značí pracovní kmitočet antény.

Jelikož anténa pracuje ve čtvrtvlnné rezonanci, je délka L důležitějším rozměrem:

$$L = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_f}} , \quad (2.3)$$

kde ϵ_f značí efektivní permitivitu, kterou vypočteme podle vztahu:

$$\varepsilon_f = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + 12 \frac{h}{W}}}, \text{ pro } \frac{W}{h} \geq 1. \quad (2.4)$$

Zde je ε_r relativní permitivita substrátu, h je jeho výška a W je šířka anténního flíčku.

Pro anténu napájenou koaxiální sondou bychom s výpočtem skončili. Pokud je ale anténa napájena mikropáskovým vedením, musíme ještě určit šířku mikropásku tak, aby vedení mělo charakteristickou impedanci $Z_0 = 50 \Omega$. Nejprve spočítáme pomocné proměnné:

$$a = \frac{Z_0}{60} \sqrt{\frac{\varepsilon_r + 1}{2}} + \frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 1} \cdot [0,23 + \frac{0,11}{\varepsilon_r}], \quad (2.5)$$

$$b = \frac{60\pi^2}{Z_0 \sqrt{\varepsilon_r}}. \quad (2.6)$$

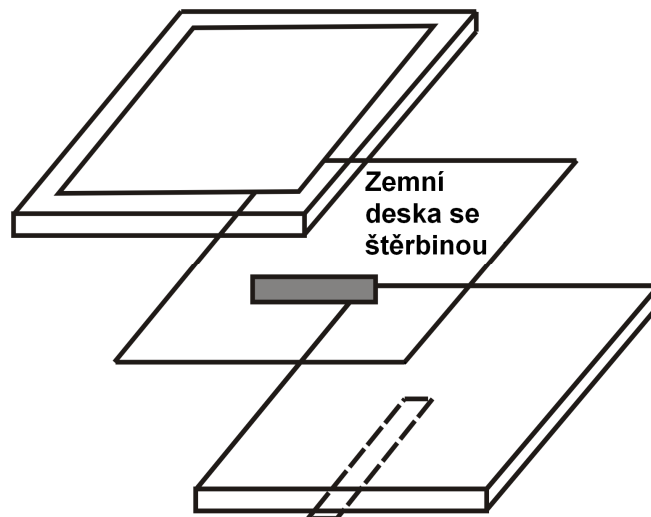
Šířka mikropásku w potom bude:

$$w = h \frac{8 \exp(a)}{\exp(2a) - 2}, \text{ pro } a > 1,52, \quad (2.7a)$$

$$w = h \frac{2}{\pi} \left\{ b - 1 - \ln(2b - 1) + \frac{\varepsilon_r - 1}{2\varepsilon_r} [\ln(b - 1) + 0,39 - \frac{0,61}{\varepsilon_r}] \right\}, \text{ pro } a < 1,52. \quad (2.7b)$$

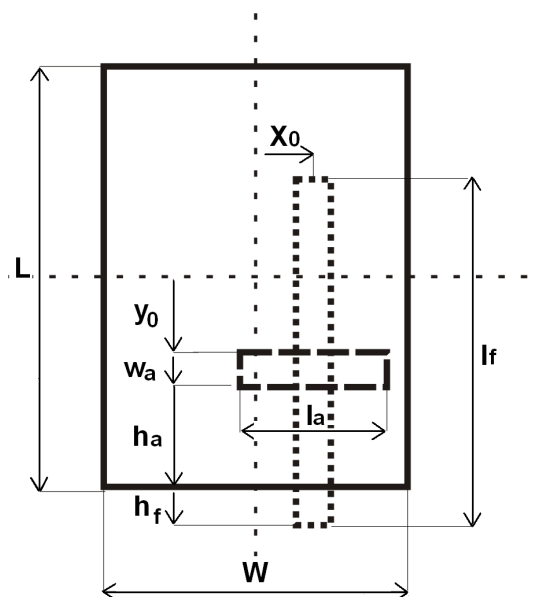
2.2 Aperturově napájená anténa

Flíčková anténa s aperturovým napájením se skládá ze tří vrstev. Anténní flíček je umístěn na nejvyšší vrstvě. Prostřední vrstvu tvoří zemní plocha, v níž se nachází štěrbina. Štěrbina bývá obvykle umístěna pod středem flíčku. Poslední třetí vrstvu tvoří mikropáskové napájecí vedení, které používá stejnou zemní plochu jako flíček (obr. 2.2).



Obr. 2.2 Struktura aperturově napájené antény

Na obr 2.3 je zobrazen pohled *shora* na aperturově buzenou flíčkovou anténu. Posuvy od osy symetrie x_0 a y_0 bývají zpravidla nulové. Protože se proud v zemní ploše nemění v celé šířce flíčku W , není posun štěrbiny o x_0 v horizontálním směru důležitý. Rozdělení proudu podél délky L způsobuje, že se vlastnosti vazby pomalu mění s posunem y_0 od nuly [11].



Obr. 2.3 Pohled na aperturově buzenou flíčkovou anténu „shora“.

Při použití aperturové vazby může mít každá vrstva jiný optimální substrát, protože jsou na sobě nezávislé a spojené pouze štěrbinou. Štěrba může mít různý tvar, díky kterému lze dosáhnout různé šířky pásma. Nejčastěji používané jsou obdélníková štěrba, kruhová štěrba a štěrba ve tvaru H.

2.3 Flíčková anténa s přepínatelnou polarizací

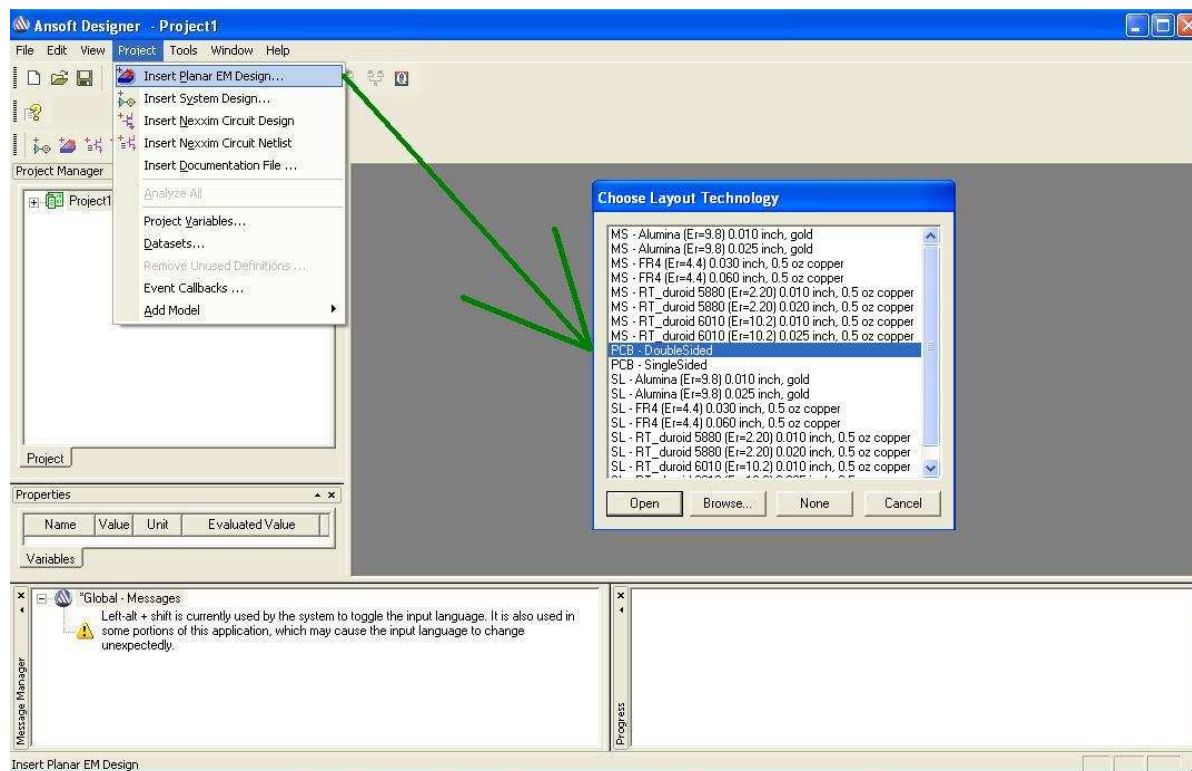
Poslední dobou se do popředí zájmu dostávají flíčkové antény, které mohou na stejné frekvenci pracovat s různými druhy polarizace. V této práci se budu dále zabývat lineárně polarizovanou anténou. Aby anténa byla využitelná i pro kruhovou polarizaci, je nutné spojit mikropáskové vedení s kruhovou štěrbinou. Lineární polarizaci lze nastavit dvěma způsoby – změnou délky otevřeného pahýlu nebo použitím otevřené kruhové štěrby namísto obyčejné [9]. Lineární polarizace, kterou je možné získat dvěma různými způsoby, umožní vznik ortogonální polarizace.

Je tedy možné realizovat flíčkovou anténu s přepínatelnou polarizací mezi dvěma pravoúhlými režimy lineární polarizace LP (vertikální a horizontální) a dvěma druhy kruhové polarizace CP (pravotočivá – RHCP, levotočivá – LHCP) [9].

3 Modelování antén v programu Ansoft Designer

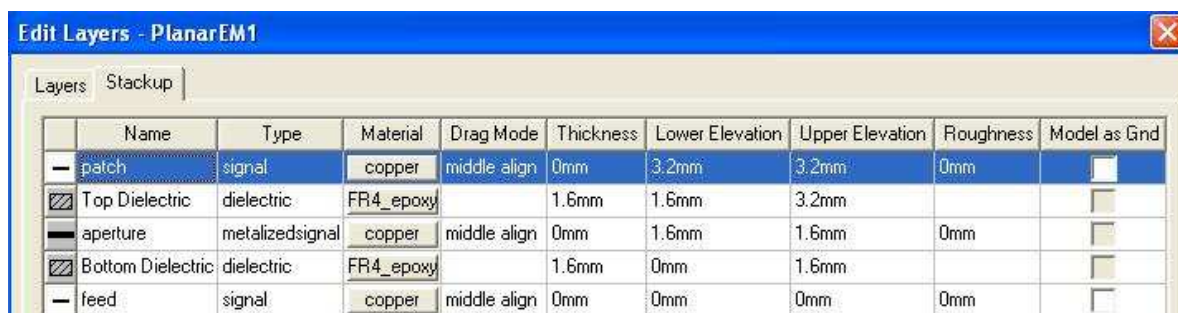
Ansoft Designer je univerzální program, který umožňuje modelovat komponenty komunikačního řetězce, skládat modely komponentů dohromady a ověřit tak funkčnost celého komunikačního systému. Ansoft Designer obsahuje modul pro numerickou analýzu planárních struktur momentovou metodou, modul pro simulaci vysokofrekvenčních obvodů, modul pro systémovou analýzu a další.

Jakmile program Ansoft Designer spustíme, musíme vybrat dielektrický substrát, na kterém budeme daný komponent vytvářet. Zvolíme *Project* → *Insert Planar EM Design*, čímž otevřeme nabídku substrátů pro mikropásková vedení (MS), substrátů pro stíněná pásková vedení (SL) a substrátů pro jednostranné (PBC – *Single Sided*) a oboustranné (PCB – *Double Sided*) plošné spoje. Vybereme substrát pro oboustranné plošné spoje (viz obr 3.1) [4].



Obr. 3.1 Hlavní okno programu Ansoft Designer.

Parametry substrátu můžeme upravit; zvolíme v menu *Layout* položku *Layers*, a dále záložku *Stack up* (viz obr 3.2).



Obr. 3.2 Záložka *Stack up* pro úpravu substrátu.

Z obrázku je patrné, že spodní vodivá vrstva je označována jako *feed*. Na ní v našem případě leží napájecí mikropásek aperturové antény; mikropásek je tvořen měděnou fólií (*copper*) o tloušťce (*thickness*) 0 mm. Výška dielektrického substrátu je 1,6 mm. Přednastavené materiály lze upravovat stiskem tlačítka *Material* v příslušném řádku; v našem případě vybereme substrát FR4 [4].

Když máme zadán substrát, musíme anténu vykreslit. K tomu slouží *Draw* → *Primitive* → *Rectangle*. Buď můžeme myší určit pozici pravého horního a levého dolního rohu obdélníkového anténního prvku nebo zadáme souřadnice (položky *X*, *Y* a rozměry *Delta X*, *Delta Y* v dolní liště). Stejný postup jako pro nakreslení anténního prvku použijeme pro vykreslení mikropáskového napájení a budící šterbiny.

Po vykreslení flíčku a napájecího mikropásku musíme budící hránu. Pomocí ikony *Select Edges* vybereme hranu, na niž chceme umístit napájecí port, a pomocí ikony *Add Port* ho na vybranou hranu umístíme.

Nyní můžeme přistoupit k analýze antény. V levé části okna programu Ansoft Designer klikneme pravým tlačítkem na položku *Analysis* a vybereme *Add Solution Setup*; následně nastavíme pracovní kmitočet antény (v našem případě 2,45 GHz). Dále klikneme pravým tlačítkem na položku *Setup1* (objeví se po nastavení pracovního kmitočtu) a nastavíme kmitočtový rozsah analýzy: volíme *Add Frequency Sweep* → *Linear Step* a nastavíme dolní a horní kmitočet analýzy a kmitočtový krok, který udává přesnost a jemnost při výpočtu výsledku. Čím přesnější výsledky chceme mít, tím menší krok musíme zadat. Na druhou stranu čím menší krok zadáme, tím vyšší početní nároky bude analýza mít. Následně v menu *Planar EM* vybereme položku *Validation Check*, abychom zkontrolovali správnost nastavení. Posledním krokem je spuštění analýzy stiskem *Analyze*.

Po vykonání analýzy vykreslíme vypočtené výsledky do grafu. Klikneme pravým tlačítkem na položku *Result* a vybereme *Create Report*. Zvolíme typ grafu (kartézský, Smithův, apod.) a zadáme veličiny, které chceme umístit na jednotlivé osy.

4 Návrh aperturově buzené antény

Klasická aperturově buzená anténa je velmi podobná flíčkové anténě s přepínatelnou polarizací, kterou se zabývám v této práci. Klasická aperturově buzená anténa je jednodušší, a proto je snazší odhalit chyby při návrhu v programu Ansoft Designer. Proto se nejdříve zabývám touto anténou.

4.1 Teoretický návrh

Prvním krokem návrhu je výpočet rozměrů anténní struktury na vybrané pracovní frekvenci. Anténa je navržena pro kmitočet $f_r = 2,45$ GHz. Použijeme substrát FR4 o výšce $h = 1,6$ mm s relativní permitivitou $\epsilon_r = 4,4$.

Nejprve je nutné určit délku vlny v substrátu λ_d podle (2.2) a efektivní permitivitu ϵ_f podle (2.4):

$$\lambda_d = \frac{3 \cdot 10^8}{2,45 \cdot 10^9 \sqrt{4,4}} = 58,3 \text{ mm},$$
$$\epsilon_f = \frac{4,4+1}{2} + \frac{4,4-1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{1+12 \frac{1,6 \cdot 10^{-3}}{25,08 \cdot 10^{-3}}}}} = 3,98.$$

Nyní spočítáme šířku antény W a délku antény L podle (2.1) a (2.3):

$$W = \sqrt{1,6 \cdot 10^{-3} \cdot 0,583348 \cdot \left[\ln \left(\frac{0,0583348}{1,6 \cdot 10^{-3}} \right) - 1 \right]} = 25,1 \text{ mm},$$

$$L = \frac{3 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 2,45 \cdot 10^9 \sqrt{3,9794}} = 30,7 \text{ mm}.$$

Rozměry flíčku již máme navrženy, zbývá navrhnout rozměry napájecího mikropásku. Jak je uvedeno v kapitole 2.1, musíme vypočítat nejprve pomocné proměnné a (2.5) a b (2.6), poté vypočteme šířku mikropásku w (2.7). Tím je teoretický návrh hotov.

$$a = \frac{50}{60} \sqrt{\frac{4,4+1}{2}} + \frac{4,4-1}{4,4+1} \left[0,23 + \frac{0,11}{4,4} \right] = 1,53$$

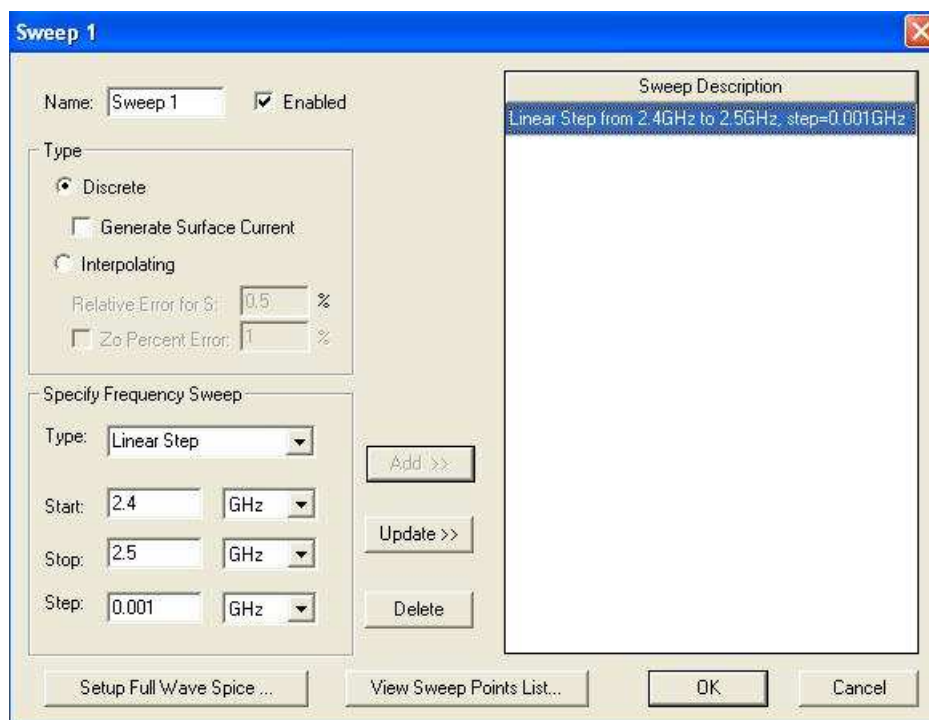
$$b = \frac{60\pi^2}{50\sqrt{4,4}} = 5,65,$$

$$w = 1,6 \cdot 10^{-3} \frac{8 \exp(1,5298)}{\exp(2 \cdot 1,5298) - 2} = 3,05 \text{ mm}.$$

4.2 Návrh modelu v programu Ansoft Designer

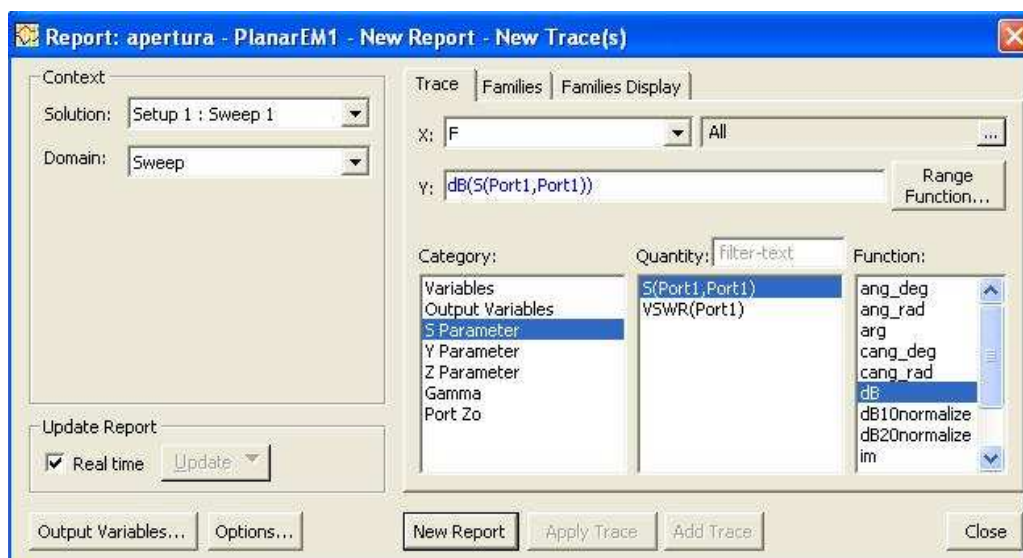
Jak je popsáno v kapitole 3, naší anténě nejvíce vyhovuje substrát pro oboustranné PBC: napájecí mikropásek (*feed*) je nanesen na vodivé vrstvě (*signal*), která je z mědi (*copper*), tloušťka vrstvy je 0 mm. Nad mikropáskem je dielektrický substrát FR4 o tloušťce

1,6 mm. Nad dielektrickým substrátem je zemní deska (*metallized signal*) z mědi o tloušťce 0 mm, do níž je vyleptána apertura. Nad aperturou je opět dielektrický substrát FR4 o tloušťce 1,6 mm. Poslední vrstvu tvoří flíček (*patch*), který je vytvořen vrstvou mědi (*signal*) o tloušťce 0 mm (obr. 3.2).



Obr. 4.1 Menu pro nastavení parametrů analýzy.

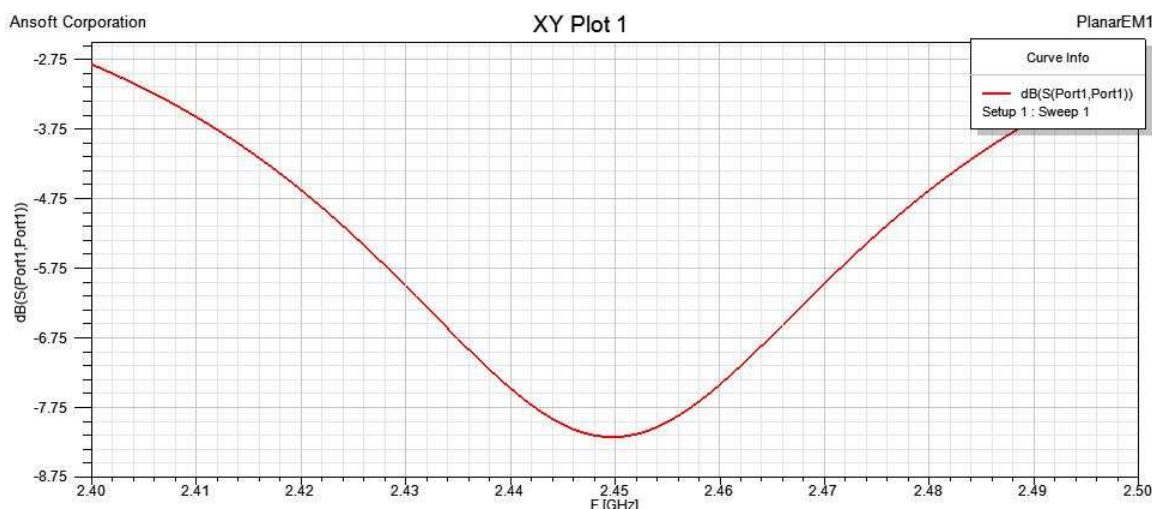
Následně je třeba vytvořit motiv antény. Musíme si přitom dát pozor, abychom každý prvek antény (budící mikropásek, aperturu a anténní flíček) kreslili ve správné vrstvě. Ansoft Designer zobrazuje při kreslení v jedné vrstvě i vrstvy ostatní, což může být nepřehledné. Po nakreslení motivu přidáme na spodní hranu napájecího mikropásku napájecí port.



Obr. 4.2 Menu pro sestavení grafu.

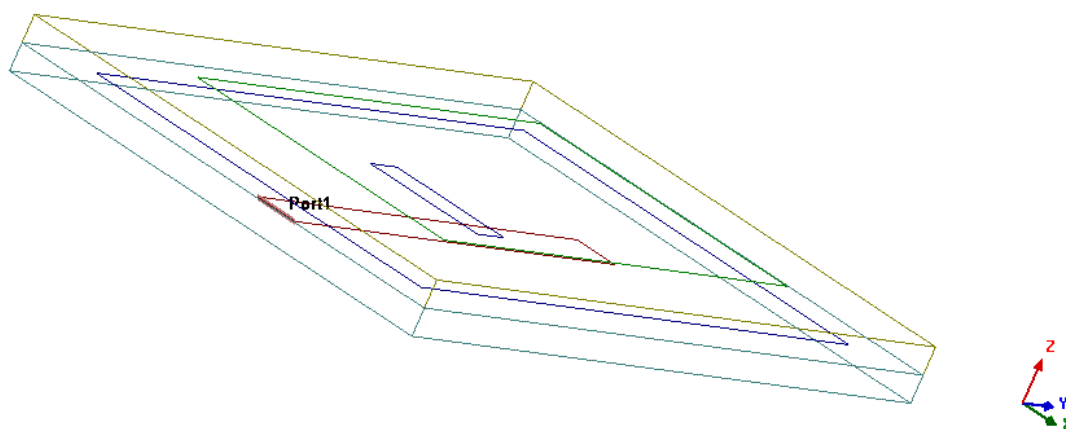
Nyní můžeme přistoupit k analýze nakreslené antény. V levé části okna programu Ansoft Designer klikneme pravým tlačítkem na položku *Analysis*, vybereme *Add Solution Setup*

a nastavíme pracovní kmitočet antény (v našem případě 2,45 GHz). Dále klikneme pravým tlačítkem na položku *Setup1* a nastavíme kmitočtový rozsah analýzy (viz kapitola 3). Následuje kontrola modelu *Validation Check* a spuštění analýzy *Analýze*.



Obr. 4.3 Kmitočtová závislost činitele odrazu s_{11} .

Posledním krokem je vykreslení grafu: klikneme pravým tlačítkem na položku *Result* a vybereme *Create Report* (viz kapitola 3). Výsledek analýzy je zobrazen na obr. 4.3. Do grafu je vynesena závislost činitele odrazu s_{11} na frekvenci.



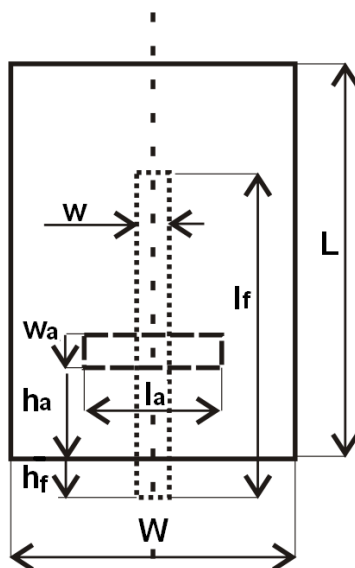
Obr. 4.4 Trojrozměrné zobrazení flíčkové antény s aperturovým napájením.

Ansoft Designer umožňuje zobrazit analyzovanou anténu trojrozměrně volbou *Planar EM* → *3D Viewer* (obr 4.4). Tento pohled nám umožňuje zkontrolovat, zda je model antény sestaven správně.

4.3 Výsledek analýzy aperturově buzené antény

Anténa rezonuje na frekvenci $f_r = 2,45$ GHz. Anténa je vyrobena z mikrovlnného substrátu FR4 o výšce $h = 1,6$ mm s relativní permitivitou $\epsilon_r = 4,4$. Anténní flíček je široký $W = 18,5$ mm a dlouhý $L = 28,0$ mm, délka štěrby je $l_a = 8,0$ mm, šířka štěrby $w_a = 2,2$ mm. Štěrba je umístěna ve vzdálenosti $h_a = 10,0$ mm od spodního okraje flíčku. Šířka napájecího mikropásku je $w = 2,8$ mm, délka mikropásku je $l_f = 25,0$ mm. Napájecí mikropásek je umístěn ve vzdálenosti $h_f = 1,14$ mm od spodního okraje flíčku (obr. 4.5). Při

těchto rozměrech se podařilo dosáhnout nejlepší hodnoty činitele odrazu $s_{11} = -8,17$ dB (obr. 4.3).



Obr. 4.5 Rozměry aperturově buzené antény.

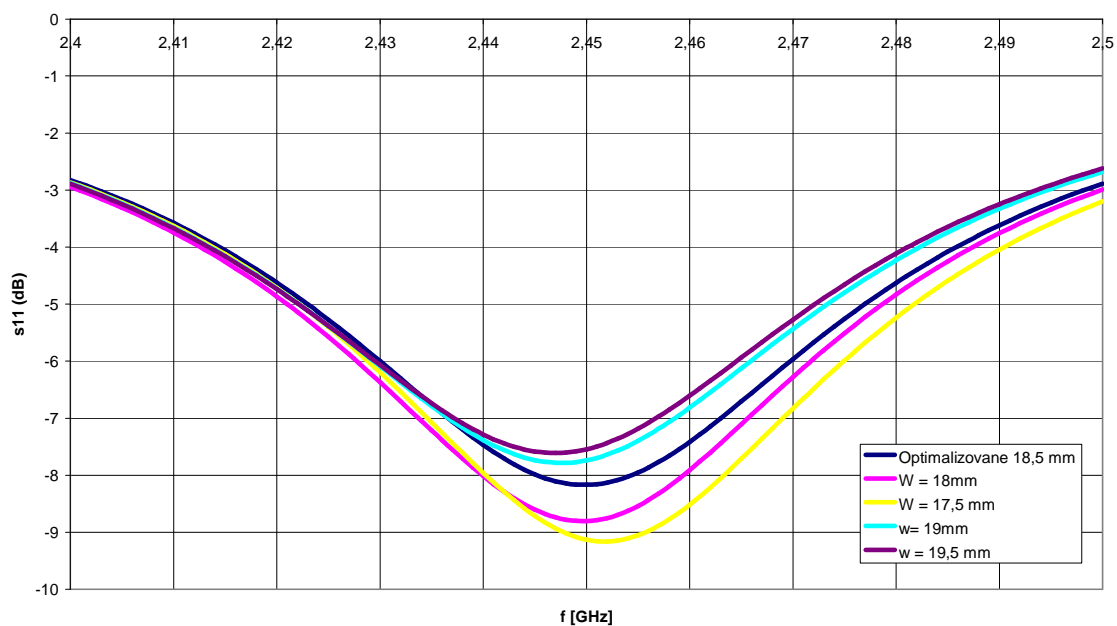
4.4 Vliv změny rozměrů na vlastnosti antény

Při návrhu a optimalizaci antény jsem sledoval, jak se mění parametry antény při změně jejich rozměrů (obr. 4.6 až 4.11). Při zužování šířky flíčku W dochází k snižování činitele odrazu s_{11} a poklesu pracovní frekvence (při zmenšení šířky se sníží efektivní permitivita a následně se zvýší délka vlny na substrátu). Změnou délky L dojde přímo ke změně rezonanční frekvence.

Parametry antény rovněž ovlivňuje napájecí mikropásek. Zkrácením jeho délky l_f snížíme rezonanční frekvenci, prodloužením l_f rezonanční frekvenci zvýšíme (vliv stojaté vlny na mikropásku). Při jakékoli změně velikosti l_f dojde k nepatrnému zhoršení impedančního přizpůsobení. Změnou šířky napájecího mikropásku měníme jeho charakteristickou impedanci, a tedy zvyšujeme nebo snižujeme hodnotu činitele odrazu s_{11} .

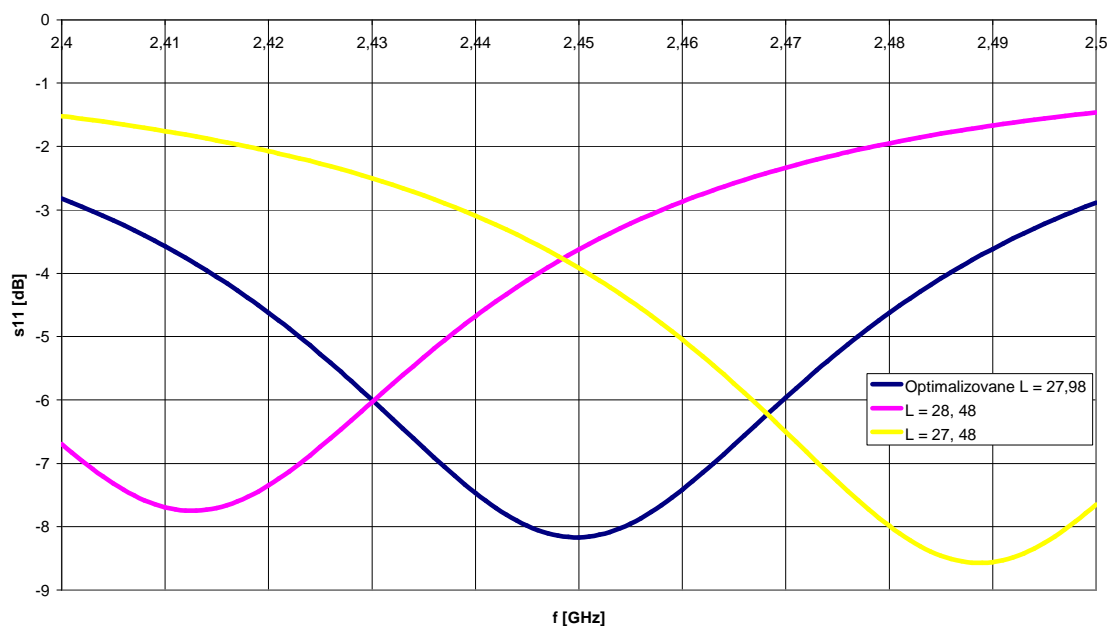
Změnou výšky štěrby w_a dojde k posunu rezonanční frekvence a ke změně impedančního přizpůsobení antény. Zkrácením délky štěrby l_a zvýšíme rezonanční frekvenci a zvýší se hodnota s_{11} . Prodloužením štěrby zvýšíme rezonanční frekvenci a snížíme hodnotu s_{11} . Při posunu celé štěrby směrem dolů se zvýší s_{11} .

Frekvenční závislost činitele odrazu s_{11} při změně šířky flíčku W

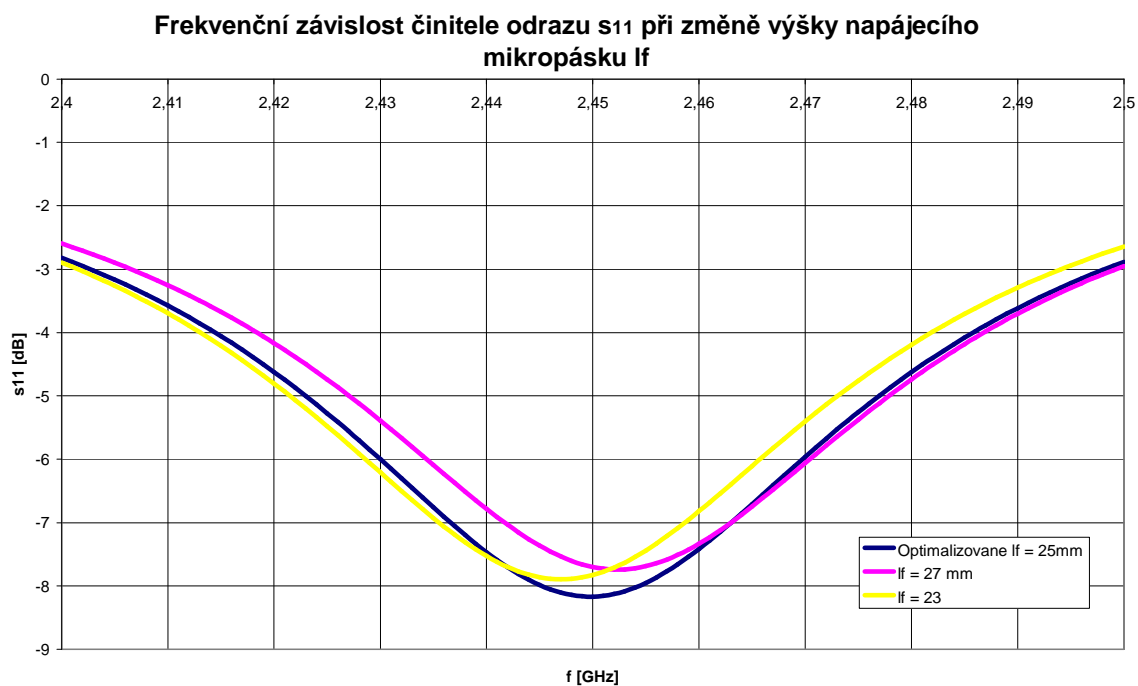


Obr. 4.6 Frekvenční závislost činitele odrazu s_{11} při změně šířky flíčku W .

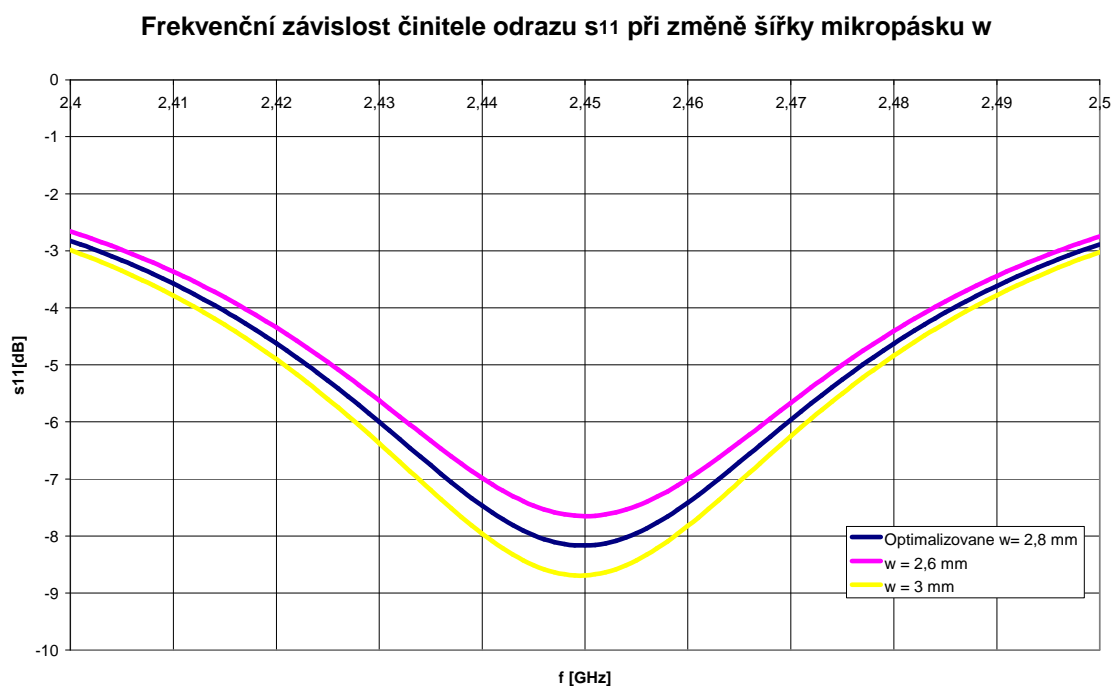
Frekvenční závislost činitele odrazu s_{11} při změně délky flíčku L



Obr. 4.7 Frekvenční závislost činitele odrazu s_{11} při změně délky flíčku L .

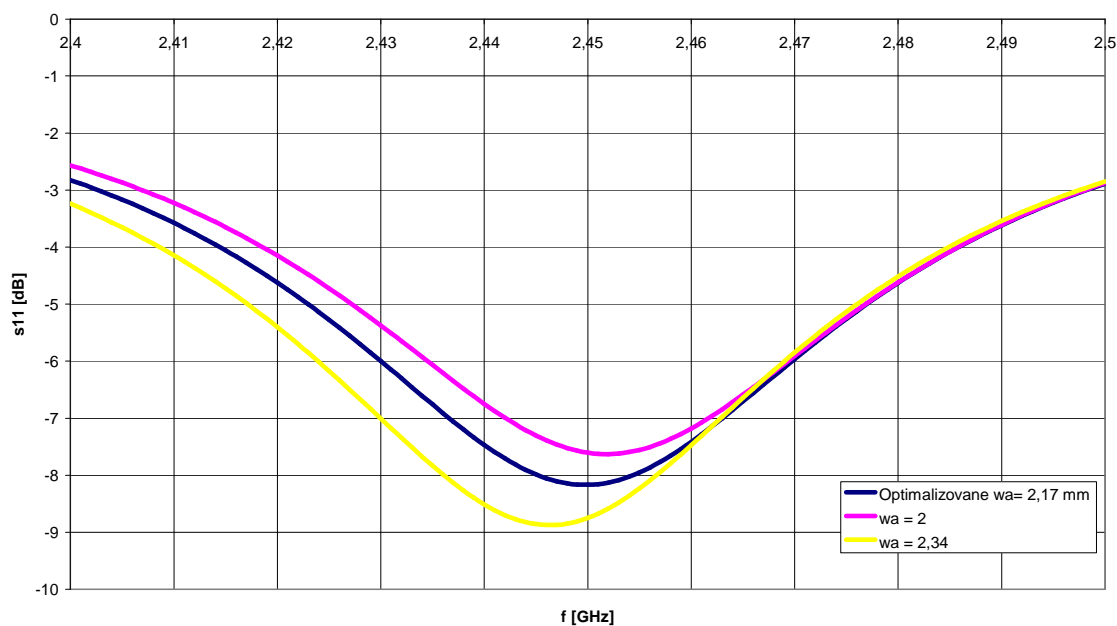


Obr. 4.8 Frekvenční závislost činitele odrazu s_{11} při změně výšky napájecího mikropásku l_f .



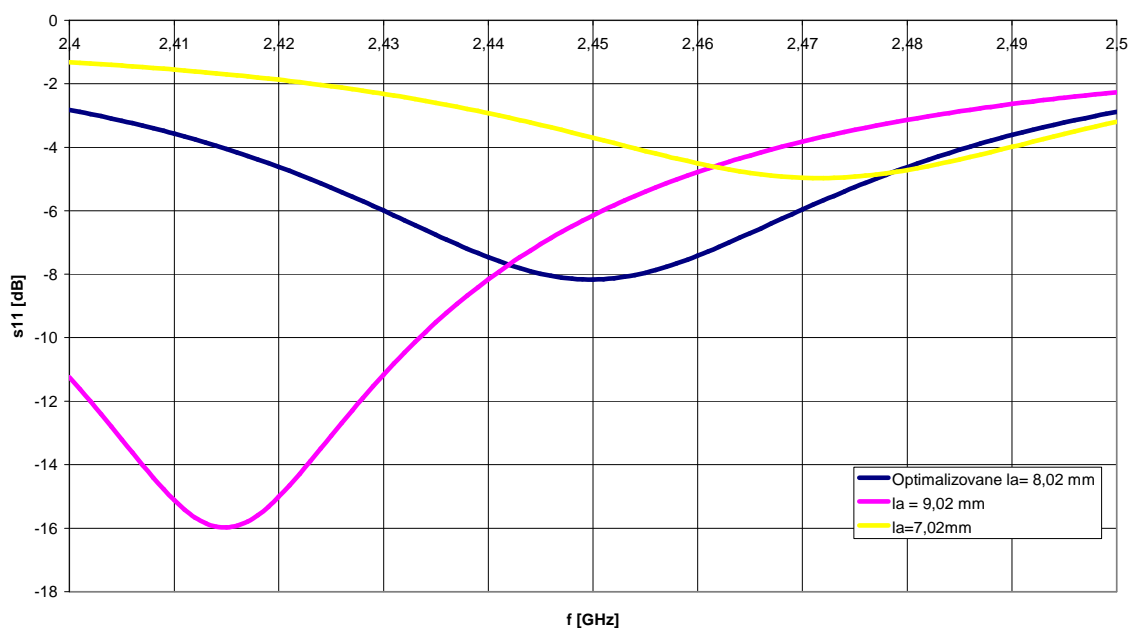
Obr. 4.9 Frekvenční závislost činitele odrazu s_{11} při změně šířky napájecího mikropásku w .

Frekvenční závislost činitele odrazu s_{11} při změně výšky štěrby w_a



Obr. 4.10 Frekvenční závislost činitele odrazu s_{11} při změně výšky štěrby w_a .

Frekvenční závislost činitele odrazu s_{11} při změně délky štěrby l_a



Obr. 4.11 Frekvenční závislost činitele odrazu s_{11} při změně v délky štěrby l_a .

5 Návrh antény s kruhovou štěrbinou

Při návrhu aperturově buzené antény jsme dosáhli poměrně přijatelné hodnoty činitele odrazu s_{11} . Přejdeme tedy k návrhu flíčkové antény s kruhovou štěrbinou.

5.1 Teoretický návrh

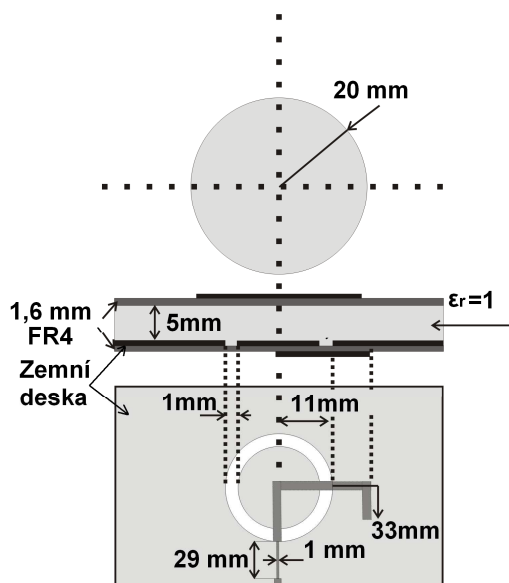
Prvním krokem je opět výpočet rozměrů antény na pracovní frekvenci. Tento krok nyní můžeme vynechat, protože rozměry antény udává [9]. Jediný rozměr, který tato literatura neuvádí je šířka napájecího mikropásku a tudíž i impedančního transformátoru. Šířku spočítáme dosazením do vzorců (2.5, 2.6 a 2.7):

$$a = \frac{Z_0}{60} \sqrt{\frac{\varepsilon_r + 1}{2}} + \frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 1} \cdot \left[0,23 + \frac{0,11}{\varepsilon_r}\right] = \frac{50}{60} \sqrt{\frac{4,4 + 1}{2}} + \frac{4,4 - 1}{4,4 + 1} \cdot \left[0,23 + \frac{0,11}{4,4}\right] = 1,53,$$

$$b = \frac{60\pi^2}{50\sqrt{4,4}} = 6,65, \quad :$$

$$w = h \frac{8\exp(a)}{\exp(2a) - 2} = 1,6 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{8\exp(1,53)}{\exp(2 \cdot 1,53) - 2} = 3,10 \text{ mm}.$$

Anténa je navržena pro pracovní frekvenci $f_r = 2,45 \text{ GHz}$. Použijeme substrát FR4 o výšce $h = 1,6 \text{ mm}$ s relativní permitivitou $\varepsilon_r = 4,4$. Mezi oba dielektrické substráty je vložen pěnový substrát s relativní permitivitou $\varepsilon_r = 1,0$ o výšce 5 mm . Rozměry antény jsou zobrazeny na obr. 5.1.



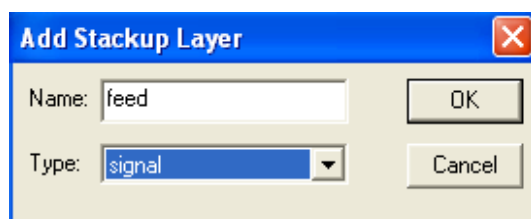
Obr. 5.1 Rozměry antény.

5.2 Návrh modelu v programu Ansoft Designer

Při modelování antény sestavíme použitý substrát sami. Proto v dialogu pro výběr substrátu vybereme možnost *None*. Jak bylo popsáno v kapitole 3, parametry substrátu definujeme prostřednictvím *Layout* → *Layers* → *Stack up*. Zvolíme *Add Layer* a zadáme spodní vrstvu (mikropáskové napájení): jméno *feed* a typ vrstvy *signal* (obr. 5.2).

Stejně pokračujeme i při vytváření ostatních vrstev; jejich nastavení je zobrazeno na obr. 5.3. Důležité je nezapomenout zvolit u vrstvy *ring_slot* typ *metallized signal*. Výška dielektrických substrátů FR4 je 1,6 mm, dielektrický substrát *foam* má výšku 5 mm.

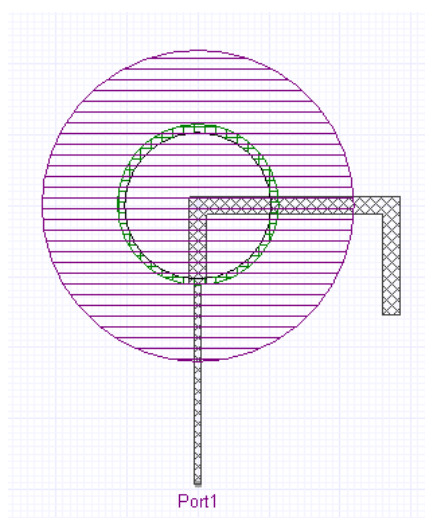
Když máme sestaven substrát, můžeme se pustit do kresby motivu antény. Na pořadí kreslení prvků nezáleží, každý prvek antény musí být ve správné vrstvě. Po nakreslení motivu antény přidáme na spodní hranu napájecího mikropásku napájecí port. Motiv antény je zobrazen na obr 5.4.



Obr. 5.2 Zadání jednotlivých vrstev substrátu.

	Name	Type	Material	Drag Mode	Thickness	Lower Elevation	Upper Elevation	Roughness	Model as Gnd
—	patch	signal	copper	middle align	0mm	8.2mm	8.2mm	0mm	<input type="checkbox"/>
▨	dielektri...	dielectric	FR4_epoxy		1.6mm	6.6mm	8.2mm		<input type="checkbox"/>
▨	foam	dielectric	air		5mm	1.6mm	6.6mm		<input type="checkbox"/>
—	ring_slot	metallized...	copper	middle align	0mm	1.6mm	1.6mm	0mm	<input type="checkbox"/>
▨	dielektri...	dielectric	FR4_epoxy		1.6mm	0mm	1.6mm		<input type="checkbox"/>
—	feed	signal	copper	middle align	0mm	0mm	0mm	0mm	<input type="checkbox"/>

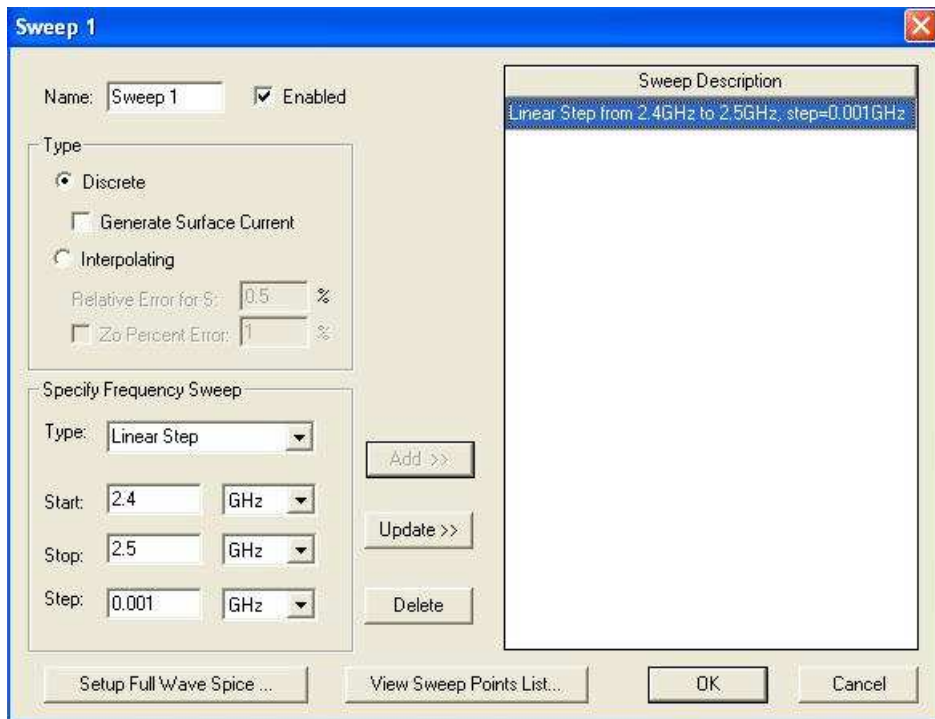
Obr. 5.3 Rozložení vrstev flíčkové antény.



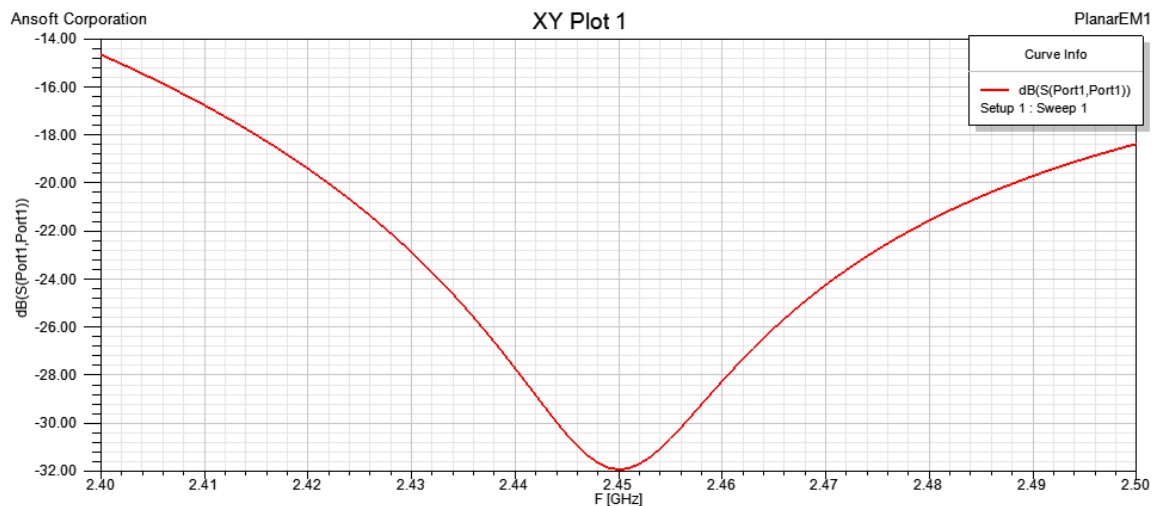
Obr. 5.4 Motiv antény v programu Ansoft Designer.

Nyní můžeme přistoupit k analýze nakreslené antény. Postupujeme přitom tak, jak bylo popsáno v předchozích kapitolách.

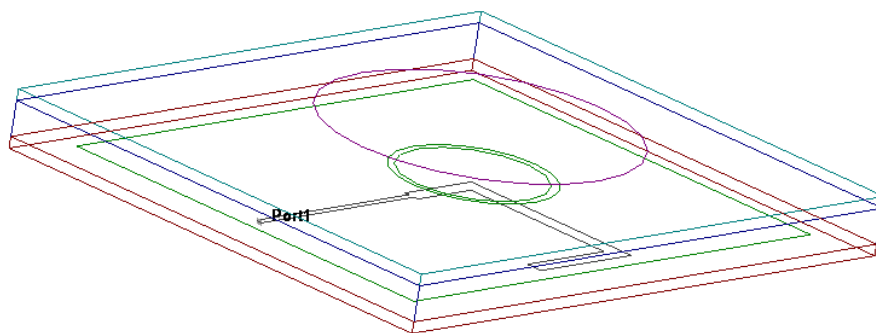
Po provedení analýzy necháme program Ansoft Designer zobrazit výsledky v grafu, který zobrazuje závislost činitele odrazu s_{11} na frekvenci (obr. 5.6). Analyzovanou anténní strukturu si můžeme opět zobrazit v trojrozměrném pohledu (obr 5.7).



Obr. 5.5 Menu pro nastavení parametrů analýzy.



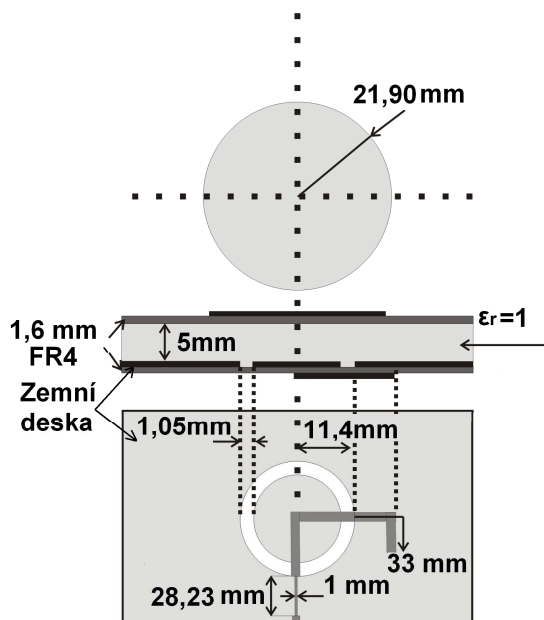
Obr. 5.6 Závislost činitele odrazu s_{11} na frekvenci.



Obr. 5.7 Trojrozměrné zobrazení antény.

5.3 Výsledek analýzy antény s kruhovou štěrbinou

Rezance antény je na frekvenci $f_r = 2,45$ GHz, anténa je vyrobena ze substrátu FR4 ($h = 1,6$ mm, $\epsilon_r = 4,4$), mezi oba substráty je vložen pěnový materiál ($h = 5,0$ mm, $\epsilon_r = 1,0$). Nejlepšího přizpůsobení $s_{11} = -31,90$ dB bylo dosaženo pro rozměry z obr 5.8.

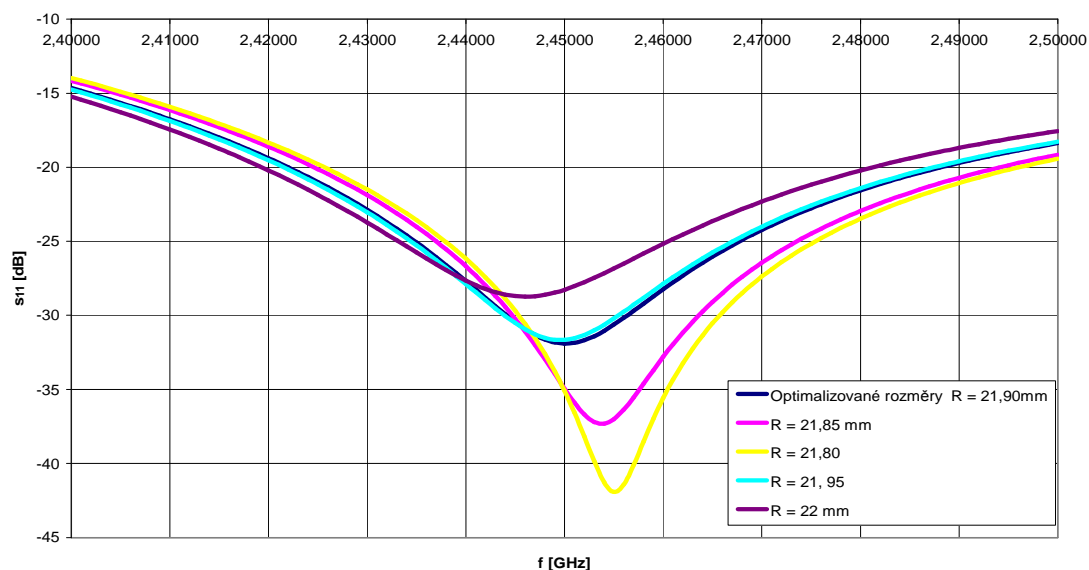


Obr. 5.8 Skutečné rozměry antény.

5.4 Vliv změny rozměrů na vlastnosti antény

Ze závislosti činitele odrazu s_{11} na změně poloměru vyzařovacího flíčku R (obr. 5.9) vyplývá, že při zvětšování poloměru dochází ke snížení rezonanční frekvence a zhoršení impedančního přizpůsobení. Naopak při zmenšení poloměru dojde ke zvýšení rezonanční frekvence a k zlepšení přizpůsobení.

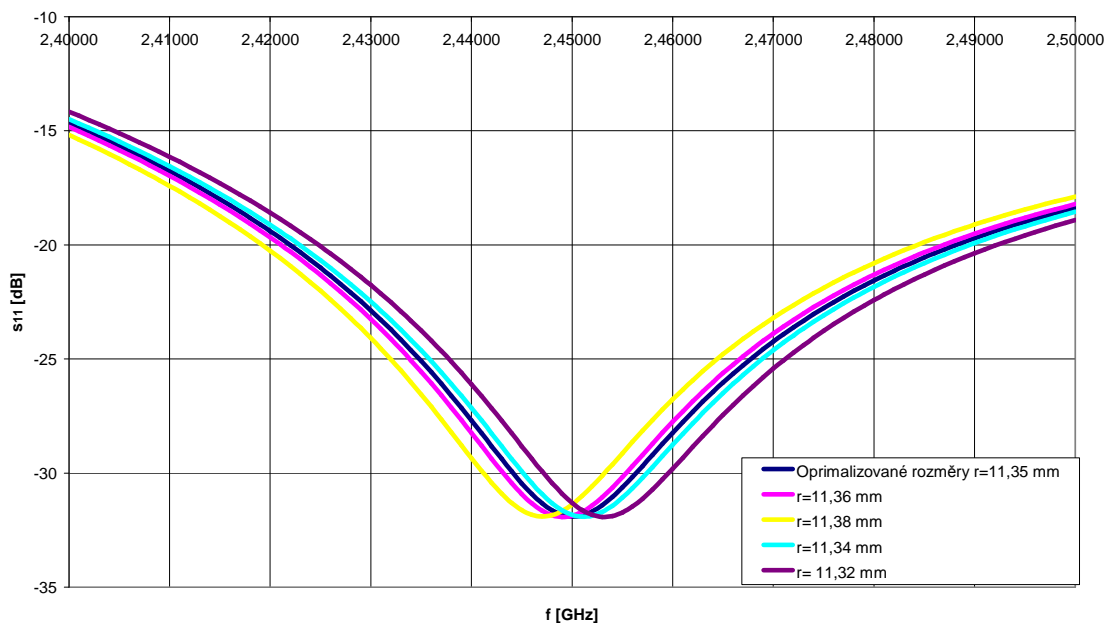
Frekvenční závislost činitele odrazu s_{11} při změně poloměru flíčku R



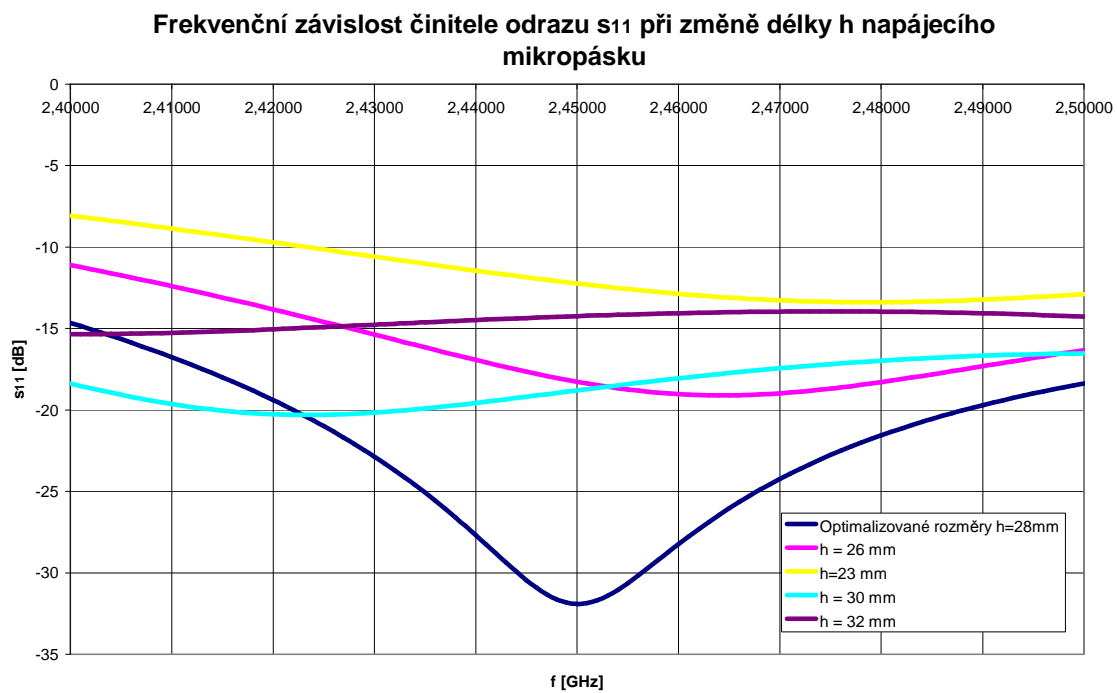
Obr. 5.9 Frekvenční závislost činitele odrazu s_{11} při změně poloměru flíčku R .

Co se týká poloměru kruhové šterbiny r , změna hodnoty činitele s_{11} v závislosti na r je zachycena na obr. 5.10. Zvětšení r snižuje rezonanční frekvenci a naopak. Hodnota činitele odrazu s_{11} zůstává přibližně stejná. Co se týká délky napájecího mikropásku, při jakékoli změně dojde ke zhoršení impedančního přizpůsobení (obr. 5.11).

Frekvenční závislost činitele odrazu s_{11} při změně poloměru šterbiny r



Obr. 5.10 Frekvenční závislost činitele odrazu s_{11} při změně poloměru šterbiny r .



Obr. 5.11 Frekvenční závislost činitele odrazu s_{11} při změně délky h napájecího mikropásku.

6 Návrh antény s přepínatelnou polarizací

Při návrhu a optimalizaci flíčkové antény s kruhovou šterbinou jsme dosáhli poměrně dobrých výsledků. Aby anténa umožňovala měnit lineární polarizaci (dále jen LP) a kruhovou polarizaci (dále CP), je nutné anténu doplnit třemi PIN diodami. Tyto diody ovládají elektrické vlastnosti vyzářujících segmentů.

6.1 Teoretický návrh

Protože vycházíme z návrhu antény s kruhovou šterbinou, nemusíme se zabývat určením rozměrů. Anténa je navržena pro pracovní frekvenci $f_r = 2,45$ GHz. Z důvodu horší dostupnosti substrátu FR4, byl použit substrát s podobnými parametry - ARLON 25N o výšce $h = 1,54$ mm s relativní permitivitou $\epsilon_r = 3,38$. Z tohoto důvodu je opět nutné přepočítat šířku napájecího mikropásku pomocí vzorců 2.5, 2.6 a 2.7:

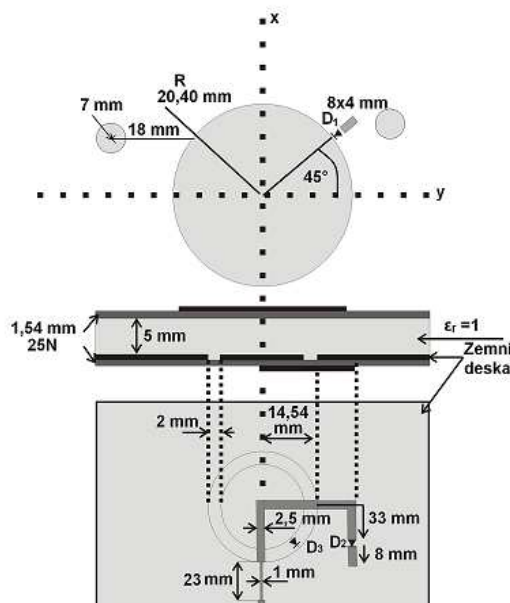
$$a = \frac{Z_0}{60} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1}} \cdot \left[0,23 + \frac{0,11}{\epsilon_r}\right] = \frac{50}{60} \sqrt{\frac{3,38 + 1}{2} + \frac{3,38 - 1}{3,38 + 1}} \cdot \left[0,23 + \frac{0,11}{3,38}\right] = 1,37,$$

$$b = \frac{60\pi^2}{50\sqrt{3,38}} = 6,44, \quad :$$

$$w = h \frac{2}{\pi} \left\{ b - 1 - \ln(2b - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left[\ln(b - 1) + 0,39 - \frac{0,61}{\epsilon_r} \right] \right\} =$$

$$= 1,54 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{2}{\pi} \left\{ 6,44 - 1 - \ln(2 \cdot 6,44 - 1) + \frac{3,38 - 1}{2 \cdot 3,38} \left[\ln(6,44 - 1) + 0,39 - \frac{0,61}{3,38} \right] \right\} = 3,14 \text{ mm}.$$

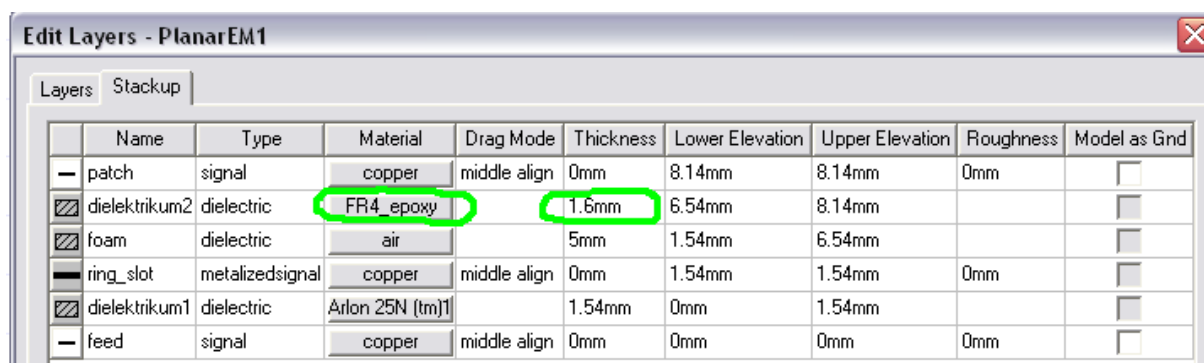
Kruhový vyzářovací flíček o poloměru 20,4 mm a obdélníkový pahýl jsou vyleptány na stejné vrstvě substrátu. Napájecí mikropásek a kruhová šterbina jsou vytvořeny na protilehlých stranách dalšího substrátu ARLON 25N. Mezi oba dielektrické substráty jsou od sebe odděleny pěnovým materiálem s relativní permitivitou $\epsilon_r = 1$ o výšce 5 mm, nebo vzduchovou mezerou. Šterbina má poloměr 14,54 mm a šířku 2 mm. Rozměry antény jsou zobrazeny na obr. 6.1.



Obr. 6.1 Rozměry antény s přepínatelnou polarizací.

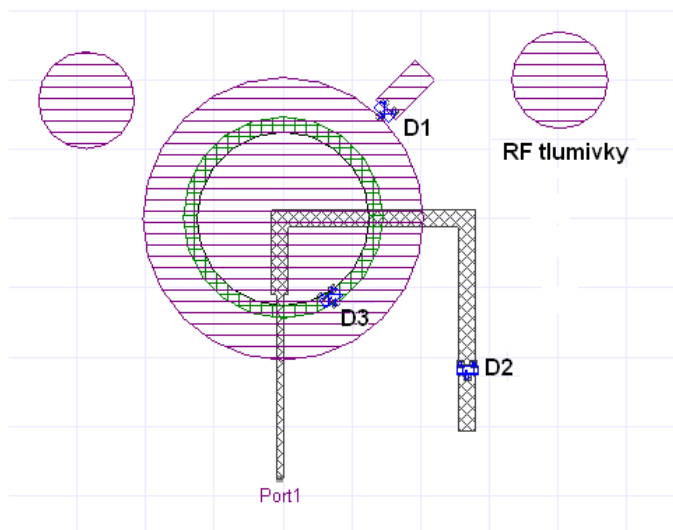
6.2 Návrh modelu v programu Ansoft Designer

Návrh antény je popsán v kapitole 5.2. Jedinou změnou oproti výše popsanému postupu je změna substrátu. Ten změníme v položce *Layout* → *Layers* → *Stack up*, kde klikneme na položku materiál, vybereme ze seznamu použitý substrát ARLON 25N a upravíme jeho výšku z 1,6 mm na 1,54 mm, viz obr 6.2.



Obr. 6.2 Změna použitého substrátu.

Motiv antény je zobrazen na obrázku 6.3. Vysokofrekvenční tlumivky RF mají poloměr 7 mm a vzdálenost od vyzařujícího flíčku 16,6 mm (čtvrtina vlnové délky na substrátu). Tyto tlumivky mají vliv na směrovou charakteristiku antény [9].

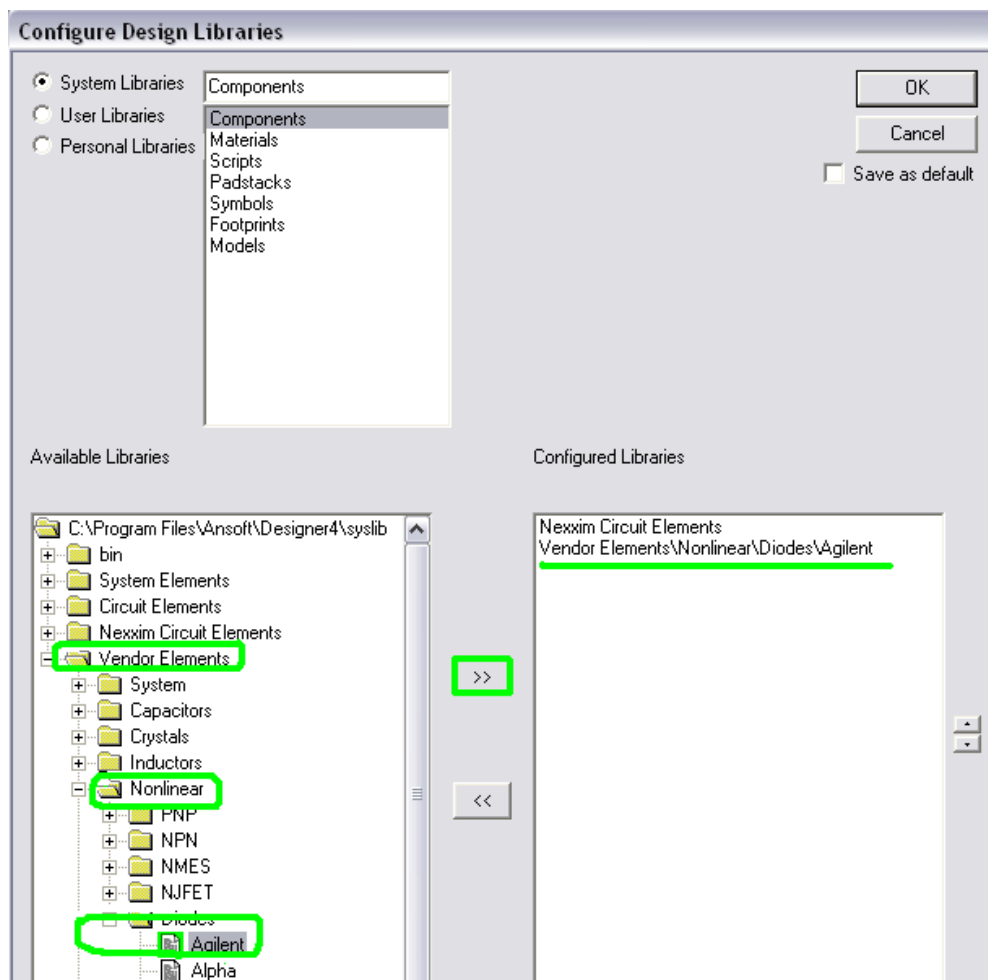


Obr. 6.3 Motiv antény.

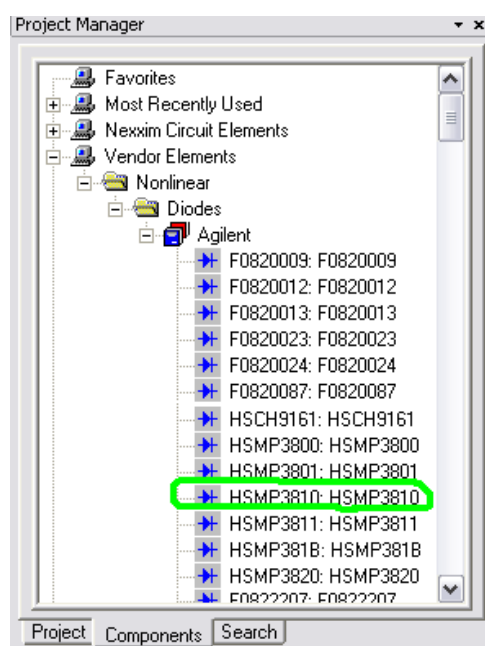
6.2.1 Vložení PIN diod

K přepínání polarizace slouží PIN diody D1 ÷ D3. Je použit model HSMP-3810, jehož výrobcem je AVAGO Technologies. Diody vložíme do planární struktury pomocí modulu pro simulaci vysokofrekvenčních obvodů, zvolíme *Project* → *Insert Nexxim Circuit Design*. Vybereme potřebný substrát. Dále si musíme nakonfigurovat potřebnou knihovnu, zvolíme položku *Tools* → *Configure Libraries*. Zvolíme položku *Components* dale *Vendor Elements* → *Nonlinear* → *Diodes* kde vybereme výrobce diod. V našem případě je výrobce AVAGO Technologies, zde je označen jako Agilent. Tlačítkem >> knihovnu přidáme. Nyní potvrdíme zmáčknutím OK.

Knihovnu máme přidanou, zbývá vložit potřebné součástky. V okně *Project Manager* (levá část obrazovky) se přepneme z menu *Project* do menu *Components*, vybereme potřebnou knihovnu a v ní potřebnou součástku, na kterou klikneme pravým tlačítkem myši a vybereme *Place Components*. Jakmile součástku umístíme do okna *Circuit Design*, zmáčkneme opět pravé tlačítko a možnost *Finish*. Poté součástku zkopírujeme do schránky a vložíme ji do okna pro numerickou analýzu planárních struktur. Vše popisují obr 6.4 a 6.5.



Obr. 6.4 Postup nakonfigurování knihovny.



Obr. 6.5 Výběr diody.

6.3 Vliv PIN diod na vlastnosti antény

Anténa je buzená mikropáskovým vedením prostřednictvím vazby s kruhovou štěrbinou na zemní ploše. Polarizaci antény lze přepínat mezi CP a horizontální LP nebo mezi CP a vertikální LP, kdy délka otevřeného pahýlu a kruhové štěrby umnožují právě přepínání polarizace. Z tohoto důvodu LP antény lze dosáhnout současnou změnou délky otevřeného pahýlu a štěrbinové kruhové vazby prostřednictvím dvou PIN diod. Takováto LP přepínatelná anténa umožní CP, pokud je zaveden budící pahýl do vyzařujícího flíčku, což umožní poslední třetí dioda.

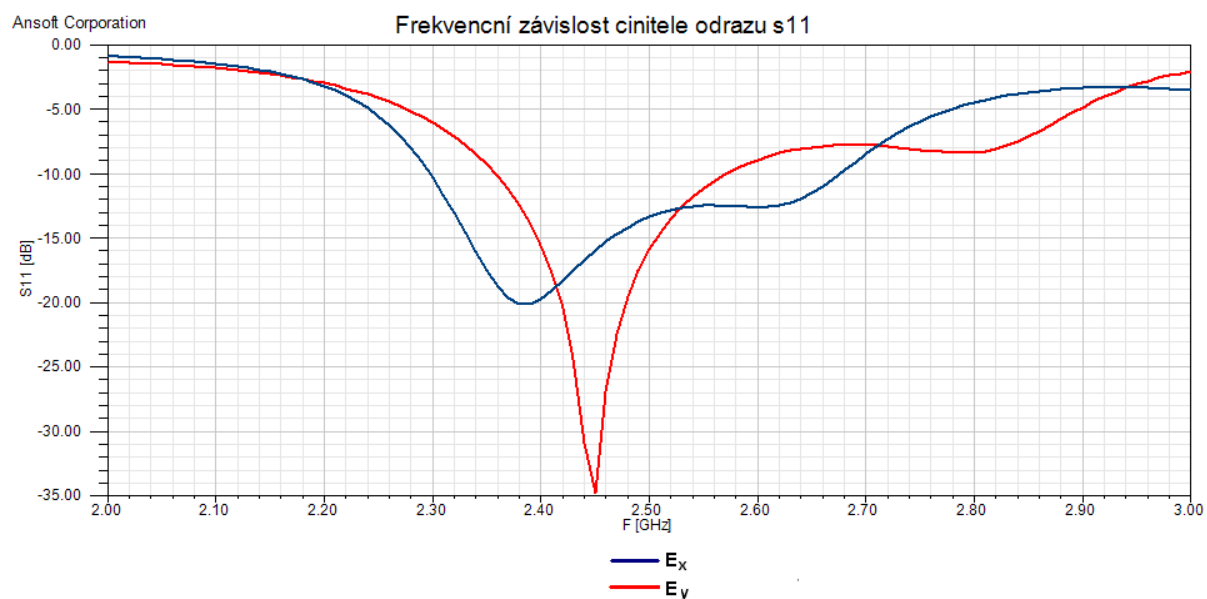
Otevřený pahýl je rozdělen na dvě části (33 a 8 mm). Dioda D2 slouží k jejich propojení následovně: pokud je dioda D2 sepnuta je délka otevřeného pahýlu $l_{s1} + l_{s2}$, pokud je dioda zavřená, je délka pahýlu l_{s1} . Vlastnosti kruhové štěrby jsou ovlivňovány diodou D3, která je posunuta od osy y o 18° . Pokud je dioda D1 vypnuta, vyzařovací flíček není napájen přes pomocný obdélníkový pahýl a anténa umožňuje LP. Když jsou diody D2 a D3 vypnuty, kruhová štěrbina umožní vytvořit LP ve směru osy y, při vhodně zvoleném l_{s1} . Naopak když jsou obě diody zapnuty, štěrbina vazby je zkratovaná a je možno získat LP ve směru osy x vhodně zvolenou délkou l_{s2} . Z výše uvedeného je patrné, že anténa umožňuje přepínat polarizaci ve směru osy x a y pomocí stavu diod D2 a D3 [9].

Lineárně polarizovaná anténa umožňuje generovat CP, pokud je vyzařovací flíček buzen. Z toho vyplývá, že pokud je zaveden budící segment do LP je možné převést ortogonální režimy na pravotočivou a levotočivou kruhovou polarizaci, RHCP, resp. LHCP. K tomuto účelu slouží vyčnívající pahýl, viz obr. 6.1 [11,12].

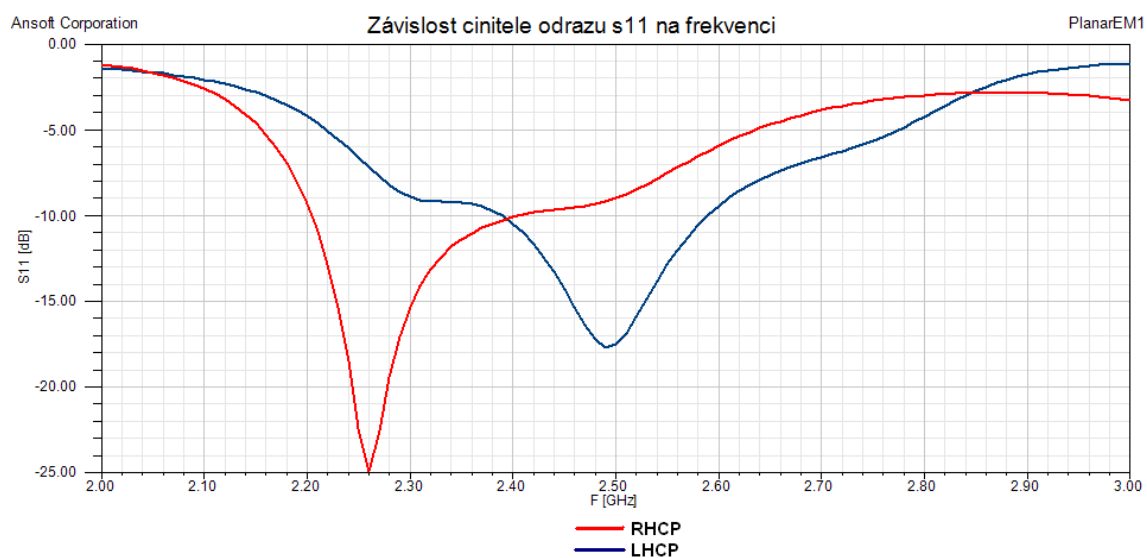
6.4. Výsledky analýzy

Tři kritické parametry, které ovlivňují polarizaci antény, jsou l_{s1} (33 mm), l_{s2} (8 mm) a úhel posunutí diody D3 od osy y (18°). Stavby všech PIN diod jsou ovládány pomocí 3-V lithiovou baterií pomocí přepínače DIP, který má dva porty (Port₁ a Port₂). Poloha portů určuje ovládací napětí V_1 a V_2 . Pokud je Port₁ v poloze *OFF*, lze přepínat horizontální a vertikální polarizaci pomocí Portu₂. Naopak pokud je Port₁ v poloze *ON*, lze přepínat polarizaci v režimu CP. Opět závisí na poloze Portu₂. Napětí na diody je přivedeno pomocí tenkého drátu o průměru 0,2 mm, který se na vysokých kmitočtech chová jako indukčnost (neprochází jím vf signál) a kruhových RF tlumivek. Při analýze bylo přepínání diod pomocí napětí, nahrazeno přímým propojením nebo rozpojením.

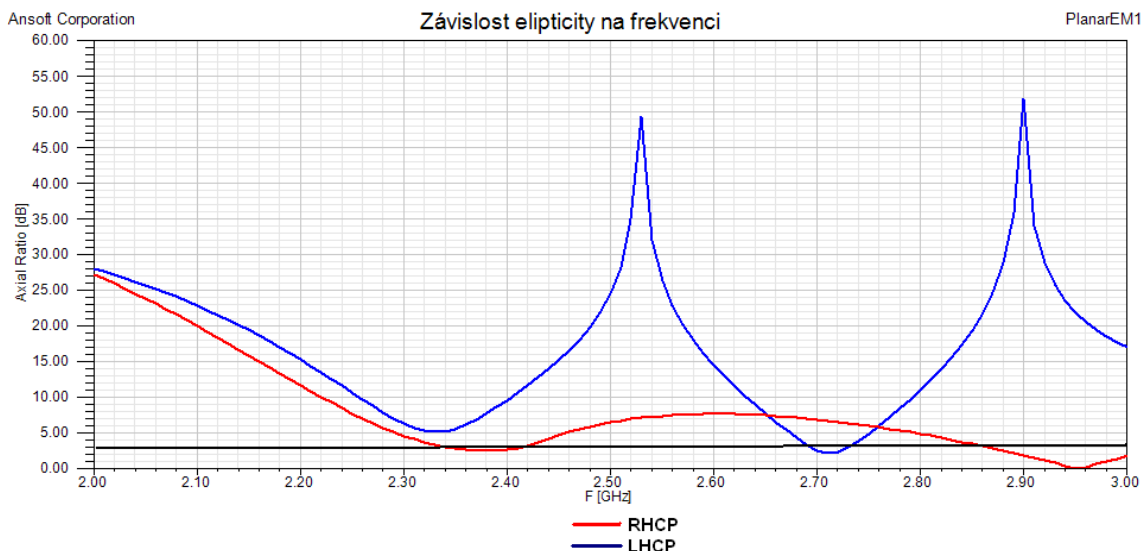
Změny činitele odrazu s_{11} v závislosti na druhu polarizace jsou zobrazeny na obr 6.6, resp. 6.7. Axial Ratio je tzv. "elipticita". Vektor kruhové polarizace rotuje a rozkládá se do dvou složek. Když jsou stejné, tak opisuje kružnici a polarizace je ideální kruhová, když nejsou stejné, tak elipsu. Poměr složek je vyjádřen v dB (0 = nejlepší). Za dobrou kruhovou polarizaci se považuje poměr do 3dB (0,707 v napětí). Anténa byla optimalizována především pro lineární polarizaci, z tohoto důvodu je elipticita poněkud vyšší a jsou posunuty i rezonanční frekvence. Závislost elipticity je zobrazena na obr 6.8.



Obr. 6.6 Simulované výsledky antény pracující ve dvou LP režimech.



Obr. 6.7 Simulované výsledky antény pracující ve dvou CP režimech.



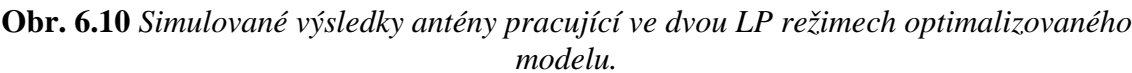
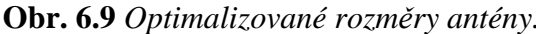
Obr. 6.8 Simulované výsledky závislosti elipticity na frekvenci.

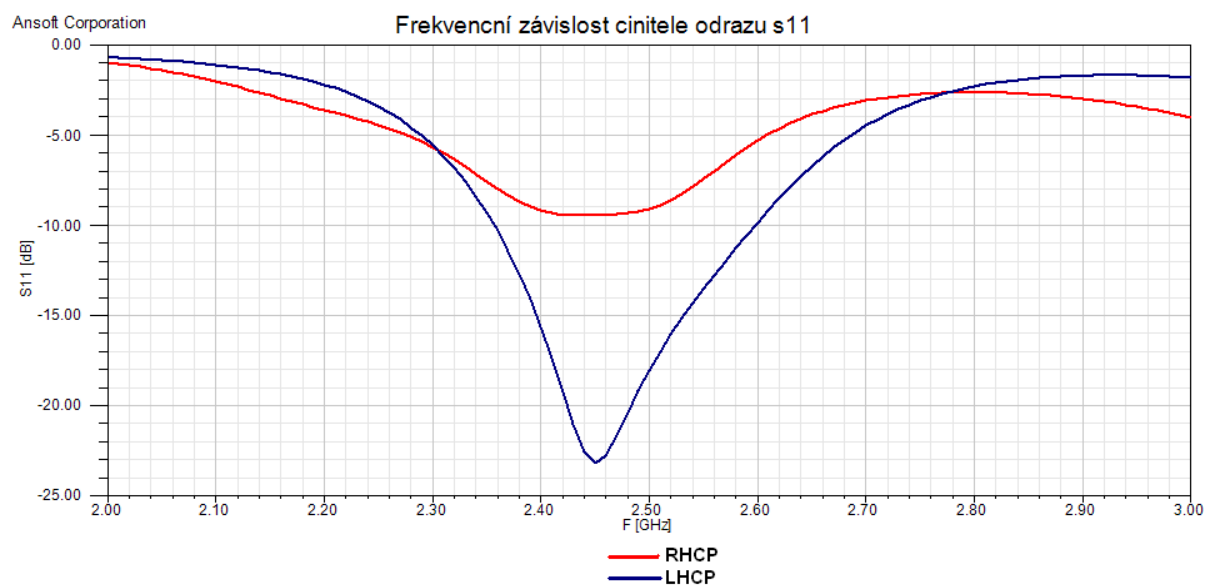
6.5 Výsledky analýzy optimalizovaného modelu

Z výsledku měření, které jsou uvedeny v kapitole 7.1, bylo zjištěno, že vyrobená anténa lze použít pouze pro jeden druh polarizace a to konkrétně vertikální. Důvodem je to, že pro změnu polarizací je použito malé stejnosměrné napětí, které musí být od vstupu antény odděleno sériově zapojeným kondenzátorem. Další úpravou bylo přidání tlumivek, které zabrání proniknutí vf. signálu do napájecího obvodu. Poslední úpravou prošel impedanční transformátor na vstupu napájecího mikropásku. Rozměry optimalizované antény jsou zobrazeny na obr 6.9. Změny činitele odrazu s_{11} v závislosti na druhu polarizace jsou zobrazeny na obr 6.10, resp. 6.11. Stejně tak závislost elipticity je zobrazena na obr 6.12.

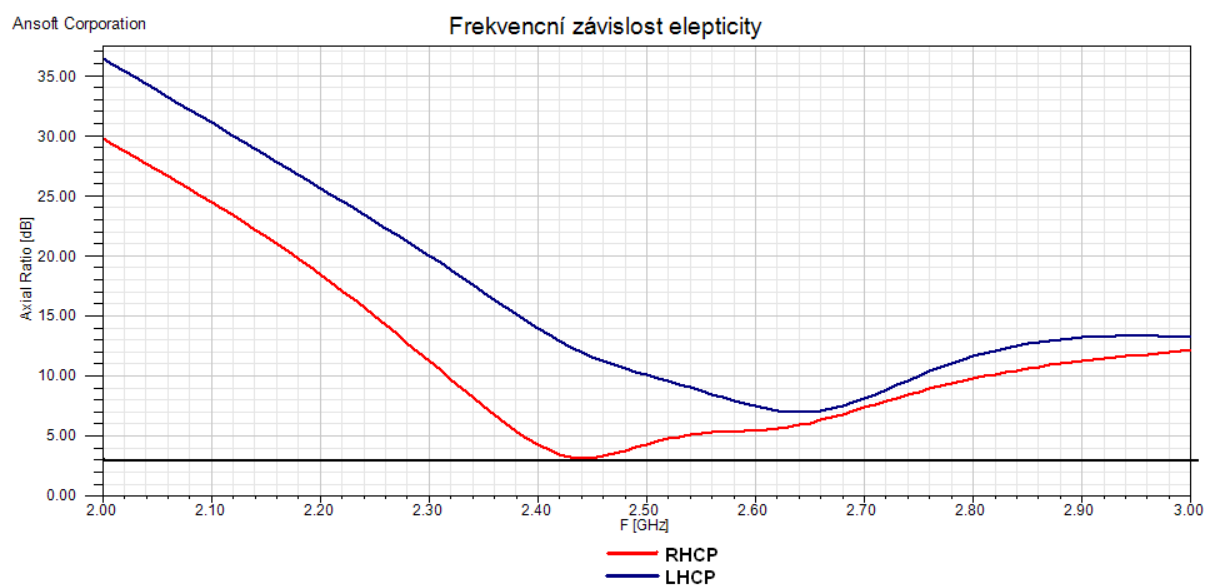
Oproti předchozímu modelu se u některých režimů sice zhoršilo impedanční přizpůsobení, zato se téměř neposunula pracovní frekvence. Elipticita se změnila jen nepatrně.

Na obr. 6.13 až 6.16 jsou ukázány simulované směrové charakteristiky z programu Ansoft Designer. Simulace probíhala na pracovní frekvenci 2,45 GHz. Z obrázků je patrné, že se charakteristiky E_{θ} a E_{ϕ} tvarem podobají.

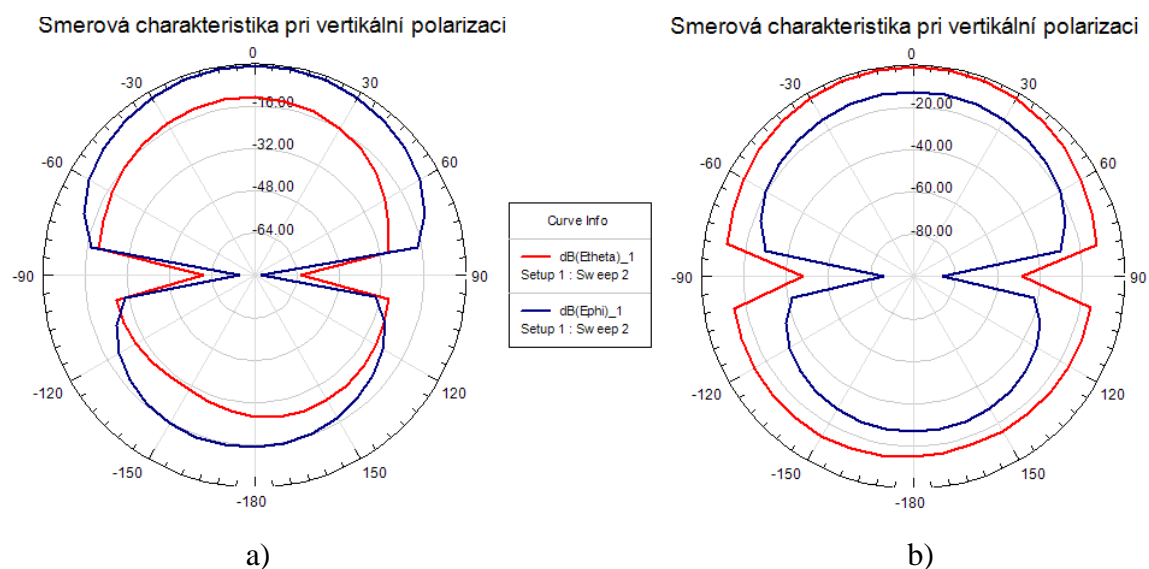




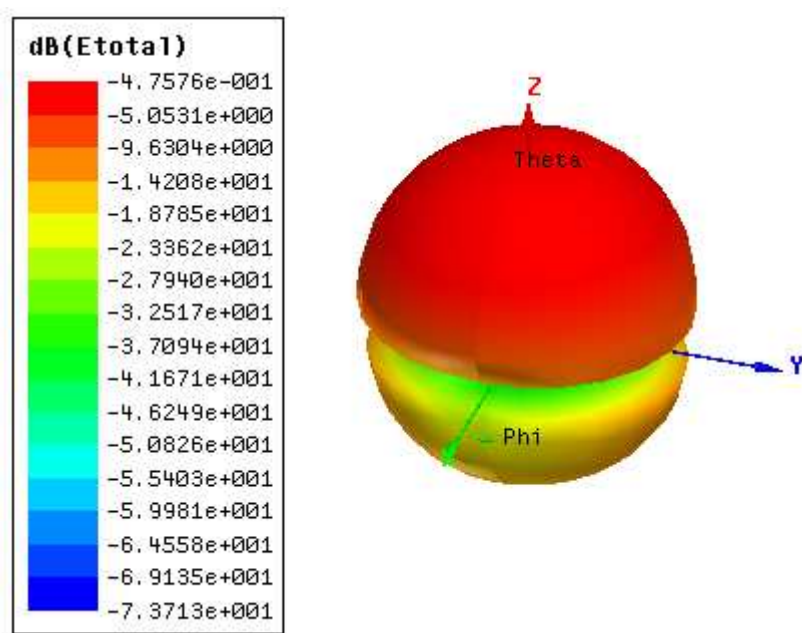
Obr. 6.11 Simulované výsledky antény pracující ve dvou CP režimech optimalizovaného modelu.



Obr. 6.12 Simulované výsledky závislosti elipticity na frekvenci pro optimalizovaný model.

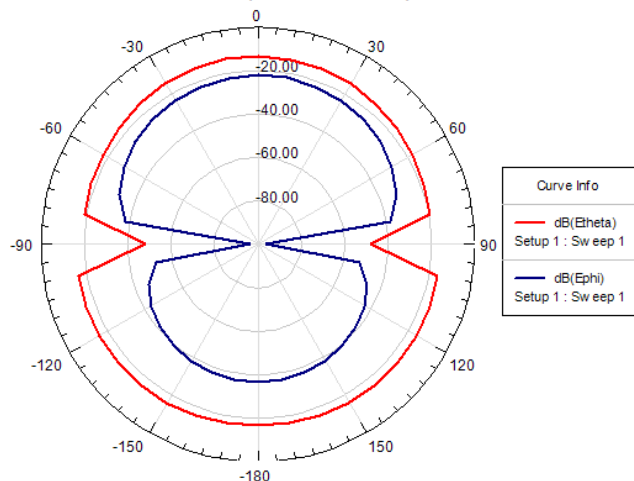


Obr. 6.13 Směrová charakteristika, při nastavení přepínače na vertikální polarizaci, $f = 2,45$ GHz. a) rovina x-z b) rovina y-z.

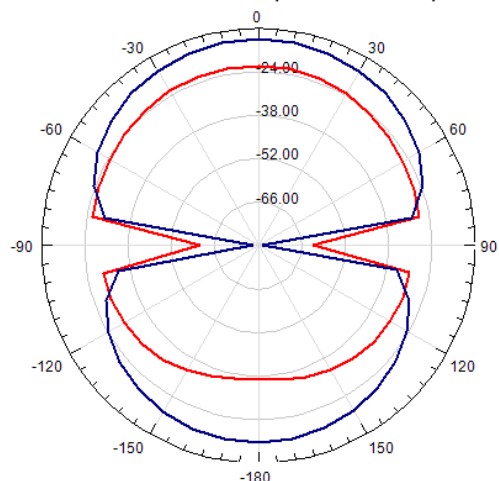


Obr. 6.14 3D směrová charakteristika při nastavení přepínače na vertikální polarizaci, $f = 2,45$ GHz.

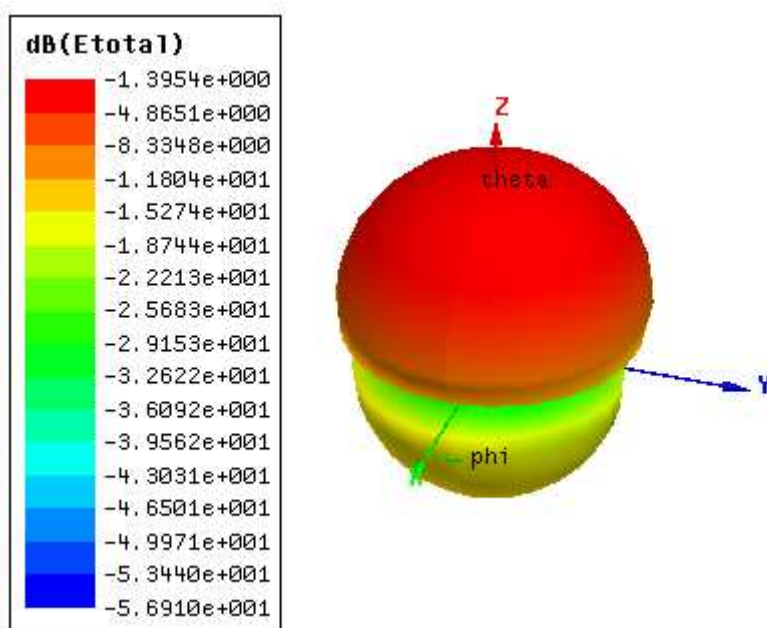
Smerová charakteristika při horizontální polarizaci



Smerová charakteristika při horizontální polarizaci



Obr. 6.15 Směrová charakteristika, při nastavení přepínače na horizontální polarizaci, $f = 2,45$ GHz. a) rovina x-z b) rovina y-z.



Obr. 6.16 3D směrová charakteristika při nastavení přepínače na horizontální polarizaci, $f = 2,45$ GHz.

7 Experimentální ověření

Oba modely antény byly vyrobeny ve školní laboratoři UREL. Pro výrobu antény byl použit export z programu Ansoft Designer – položka Layout → *Export File* – do formátu *.ger. Tento formát pak v programu Gerber Magic můžeme převést do formátu *.pdf, popřípadě do formátu Gerber RS274x - *.gbr (<http://www.bronzware.com/GerbMagic>). Předlohy pro výrobu antény metodou tištěných spojů jsou zobrazeny v příloze 1. Předlohy se pokládají na substrát stranou toneru. Na obrázku 13.1 a 13.2 jsou zobrazeny předlohy pro napájecí mikropásek a šterbinu. Oba motivy jsou naneseny na protilehlých vrstvách téhož substrátu. Motiv vyzařovacího flíčku je zobrazen na obr. 13.3, tento motiv je nanesen na samostatné desce. Pro obě desky byl použit substrát ARLON 25N, o výšce $h = 1,54$ mm a relativní permitivitě $\epsilon_r = 3,38$. Fotografie obou modelů ukazuje obr 7.1 a 7.2. K přepínání polarizace slouží PIN diody, které jsou napájeny pomocí 3-V lithiovou baterií, která spolu s přepínačem DIP umožňuje měnit vlastnosti antény. Mezi přepínačem a PIN diody byly vloženy ochranné SMD rezistory o velikosti 1k a 2k. Oddělovací SMD kondenzátor na vstupu má hodnotu $C = 10$ pF.

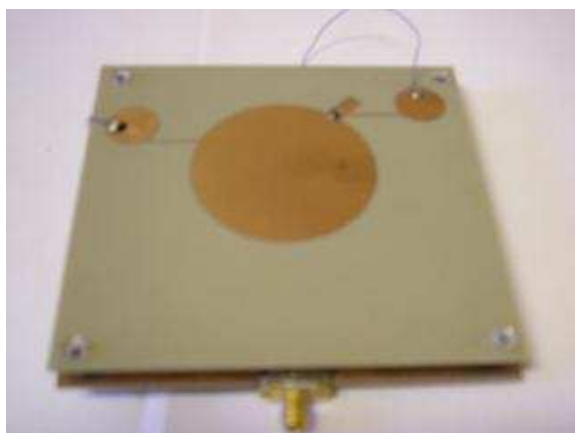


a)



b)

Obr. 7.1 Fotografie kompletního původního modelu: a) přední strana b) zadní strana.



a)



b)

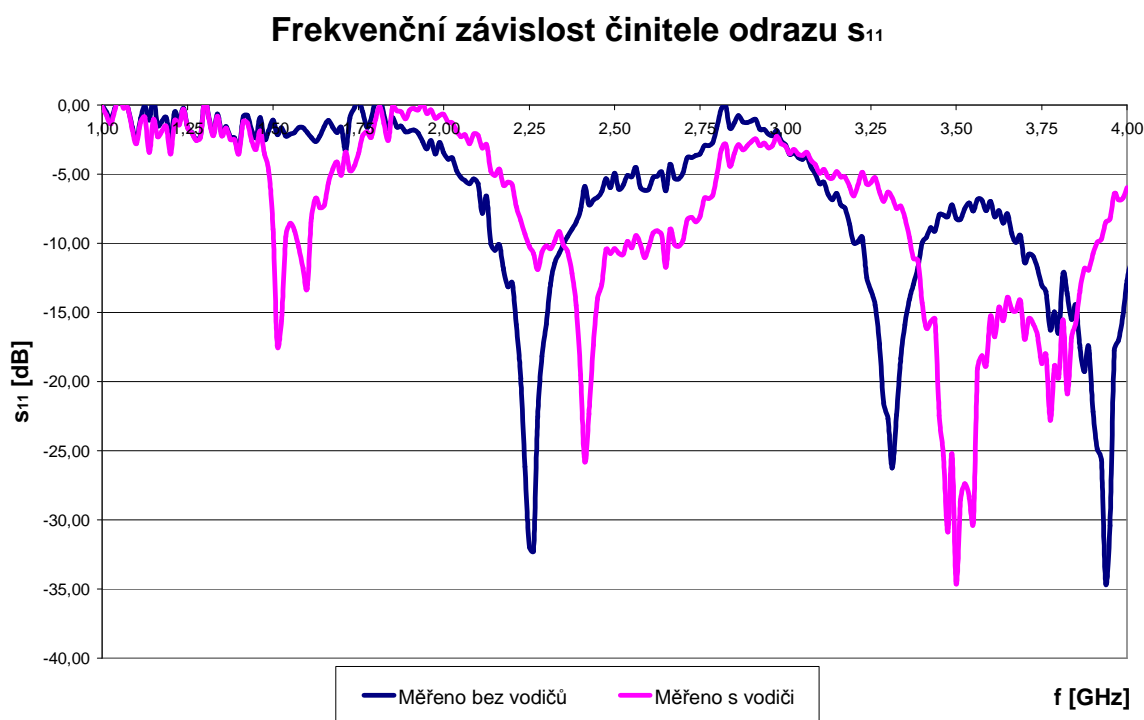
Obr. 7.2 Fotografie kompletního optimalizovaného modelu: a) přední strana b) zadní strana.

7.1 Měření činitele odrazu s_{11}

Místo měření: VUT Brno, laboratoř č. 737, měření provedl ing. Tomáš Urbanec, Ph. D, Michal Havelka.

Měření modulu činitele odrazu bylo provedeno pomocí vektorového analyzátoru RHODE&SCHWARZ ZVL 6, který má frekvenční rozsah od 9 kHz do 6 GHz. Analyzátor má USB výstup a umožňuje export dat v textovém souboru, který lze převést do MS Excel. Měření prvního modelu proběhlo pouze pro modul činitele odrazu s_{11} vertikální polarizace z důvodu, který je uveden výše. Graf změřené frekvenční závislosti činitele odrazu s_{11} je zobrazen na obr. 7.3. Pojem „měřeno s vodiči“ znamená, že na anténě byly ponechány vodiče napájecího obvodu. Do těchto vodičů se dostal vf. signál, který způsobil vznik parazitní rezonance na frekvenci $f = 1,51$ GHz. Z tohoto důvodu jsme měření opakovali po odpájení všech vodičů, toto měření je na obr. 7.4 označeno jako „měřeno bez vodičů“.

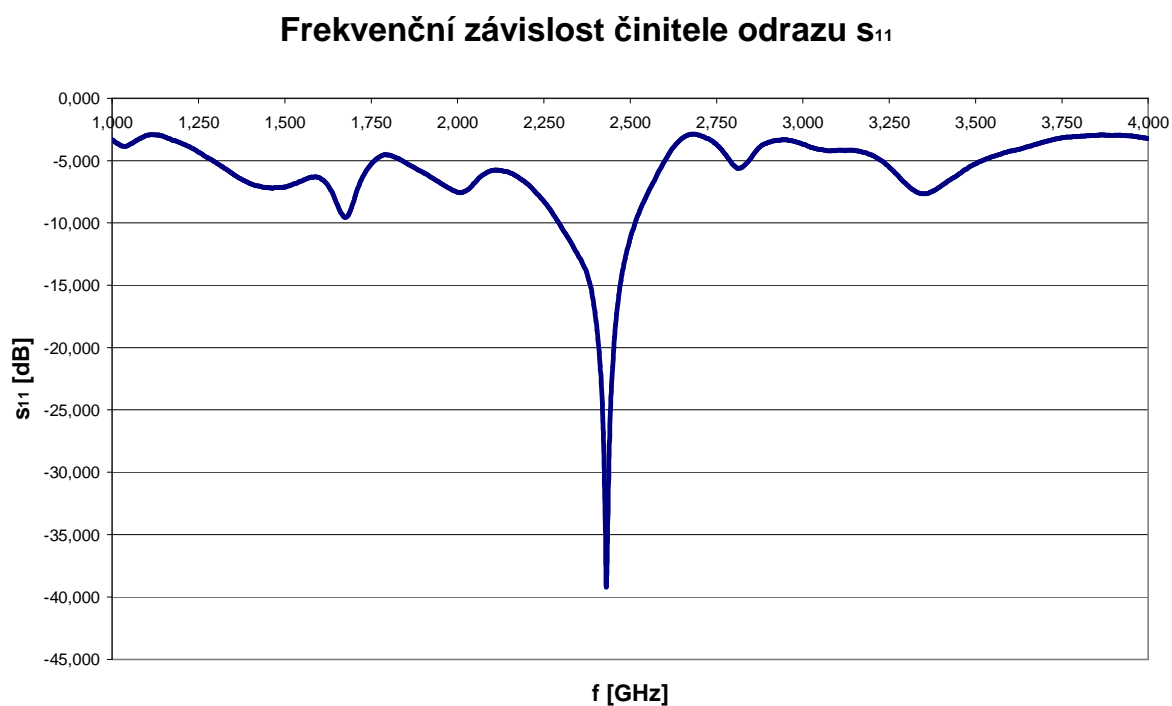
Měření optimalizovaného modelu proběhlo již pro všechny režimy polarizace – vertikální, horizontální a oba režimy kruhové polarizace (pravotočivá a levotočivá). Změřené výsledky jsou zobrazeny na obr. 7.4 až 7.7.



Obr. 7.3 Činitel odrazu s_{11} původního modelu při vertikální polarizaci.



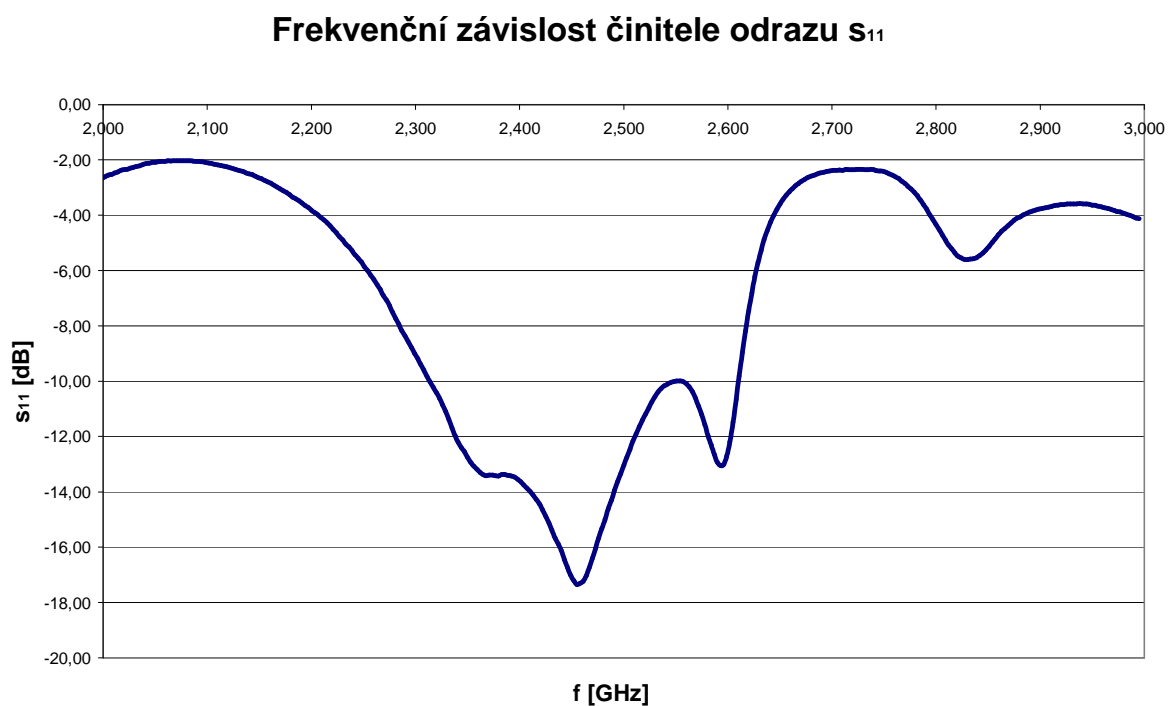
Obr. 7.4 Činitel odrazu s_{11} optimalizovaného modelu při vertikální polarizaci.



Obr. 7.5 Činitel odrazu s_{11} optimalizovaného modelu při horizontální polarizaci.



Obr. 7.6 Činitel odrazu s_{11} optimalizovaného modelu při pravotočivé kruhové polarizaci.

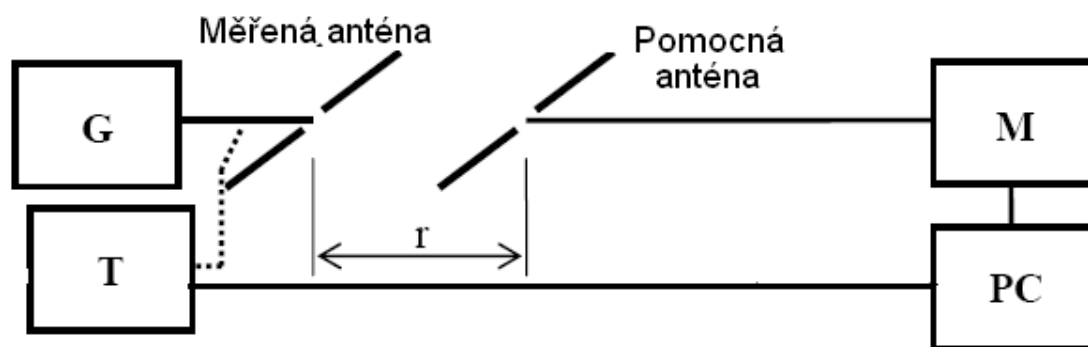


Obr. 7.7 Činitel odrazu s_{11} optimalizovaného modelu při levotočivé kruhové polarizaci.

7.2 Měření směrových charakteristik

Měření směrových charakteristik proběhlo na katedře radiolokace Univerzity obrany ČR pod vedením Ing. Miroslava Zemana a Ing. Michala Pokorného v bezodrazové komoře.

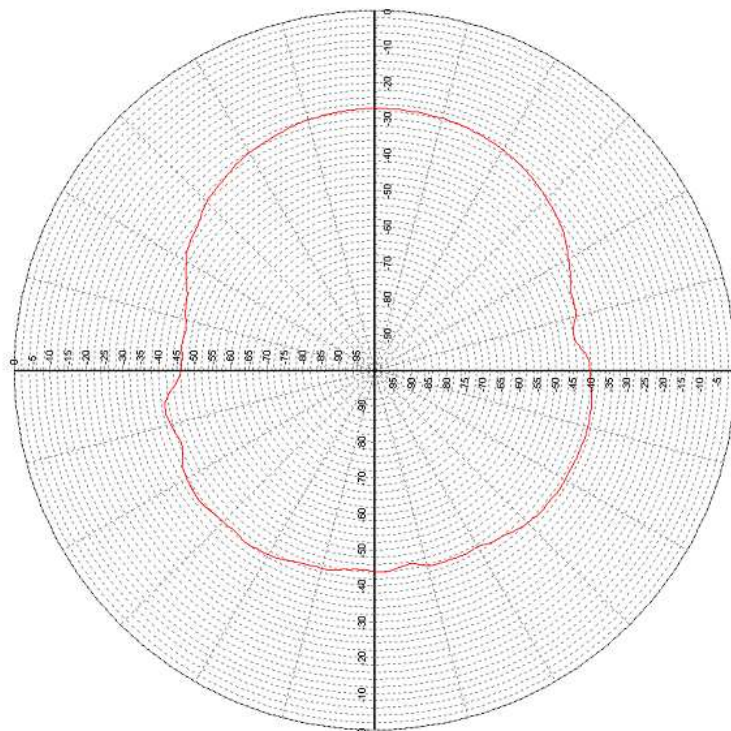
Měření proběhlo tak, že se měřená anténa umístila na točnu, která s anténou otáčí v rozmezí 0° až 360° . Na druhé straně komory je ve vzdálenosti r (v našem případě $r = 4$ m) umístěna pomocná anténa, která přijímá signál z měřené antény. Pomocná anténa je vf. kabelem spojena s počítačem, který zapisuje naměřená data. Zapojení měřícího pracoviště je ukázáno na obr. 7.8. Měření lze provádět i obráceně, kdy září pomocná anténa a měřící anténa přijímá signál. Na obr. 7.9 je zobrazeno umístění antény v bezodrazové komoře. Změřené směrové charakteristiky pro LP jsou zobrazeny na obr. 7.10 až 7.17. Charakteristiky byly měřeny pouze u optimalizovaného modelu. Byly změřeny pouze stavy přepínače umožňující lineární polarizaci, z důvodu že se v komoře vyskytovali jen lineárně polarizované přijímací antény.



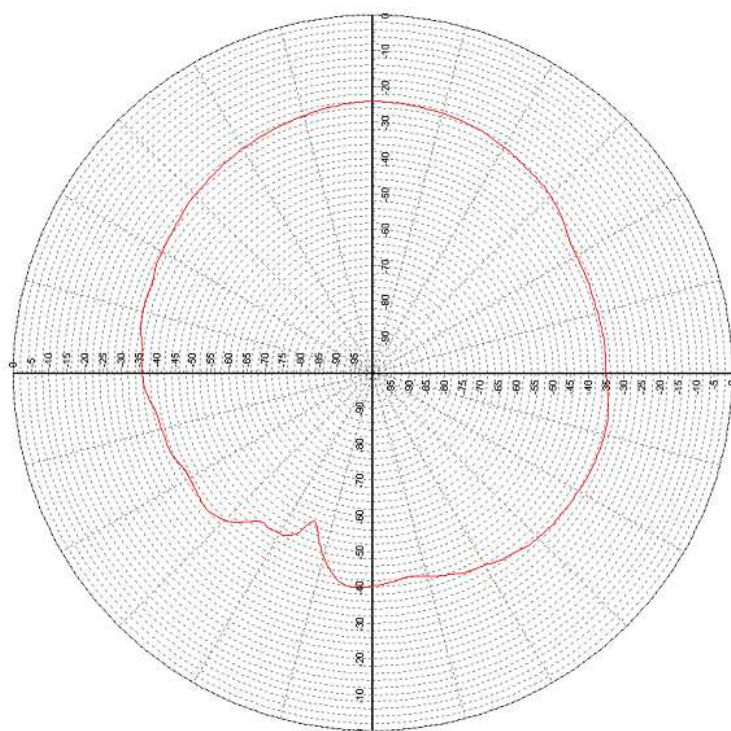
Obr. 7.9 Schéma pracoviště pro měření směrových charakteristik.



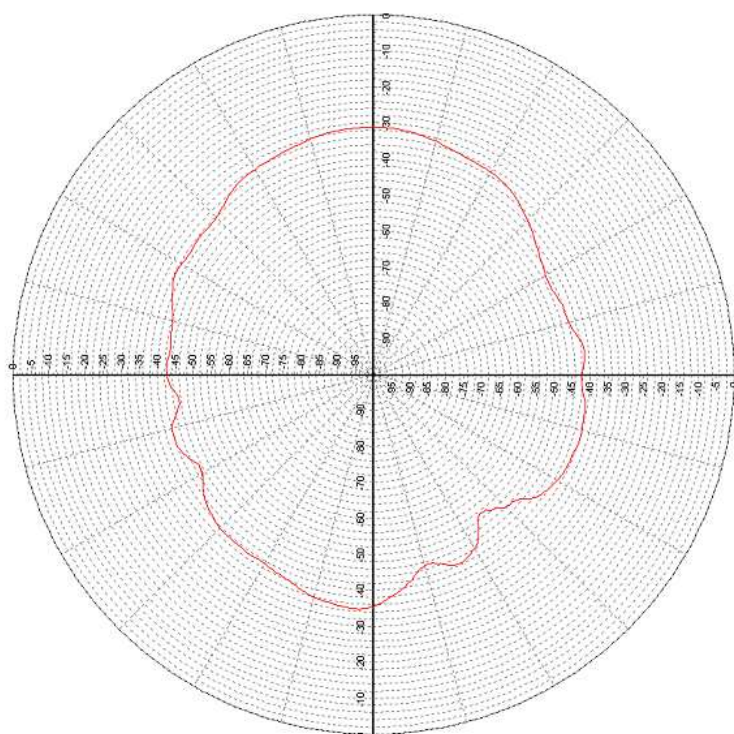
Obr. 7.9 Umístění měřené antény v bezodrazové komoře.



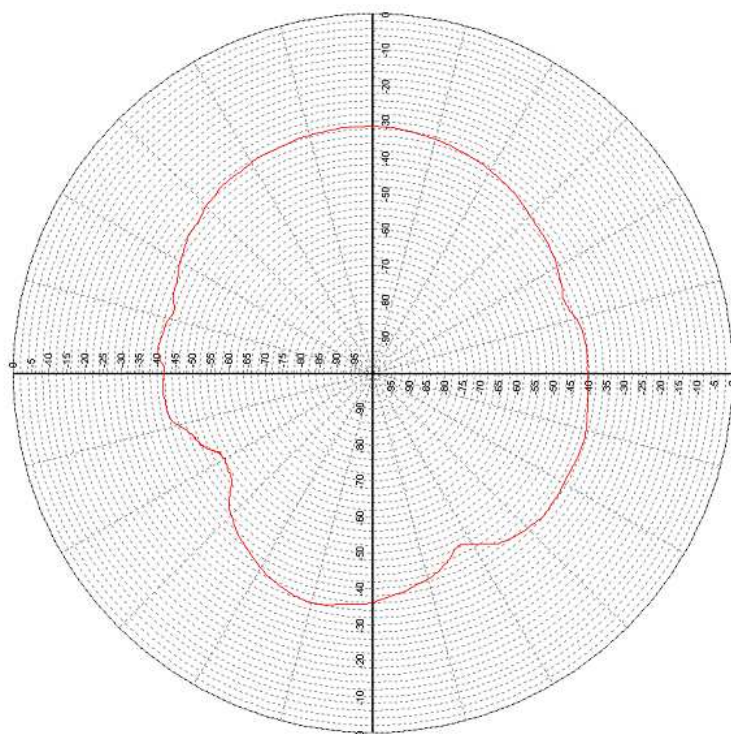
Obr. 7.10 Měřená směrová charakteristika při vertikální polarizaci rovina y-z, složka $E_{\phi i}$, $f = 2,45 \text{ GHz}$.



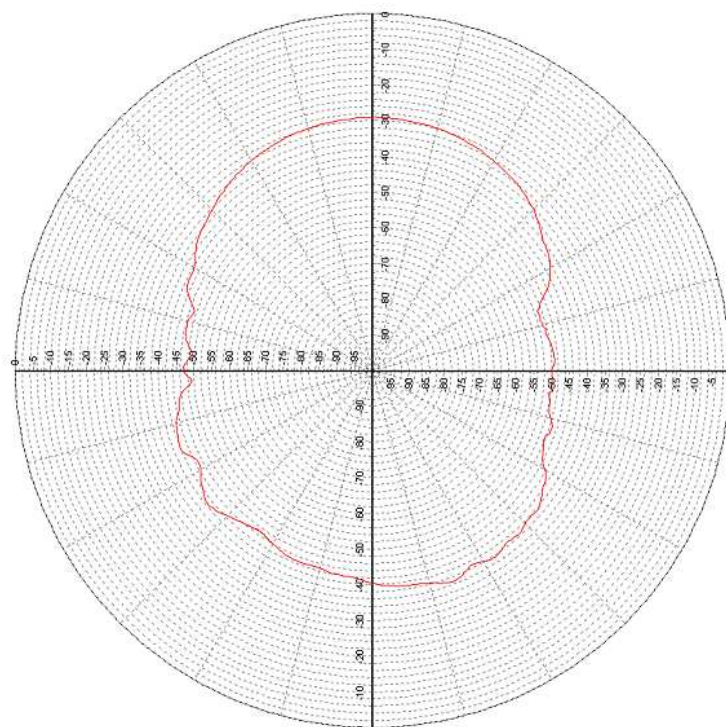
Obr. 7.11 Měřená směrová charakteristika při vertikální polarizaci rovina y-z, složka $E_{\theta \eta}$, $f = 2,45 \text{ GHz}$.



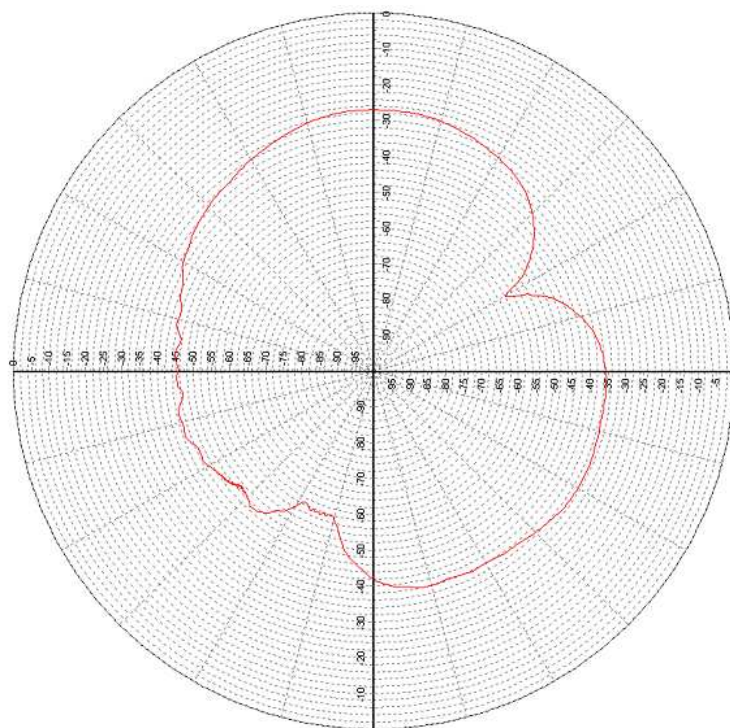
Obr. 7.12 Měřená směrová charakteristika při vertikální polarizaci rovina x-z, složka $E_{\phi i}$, $f = 2,45$ GHz.



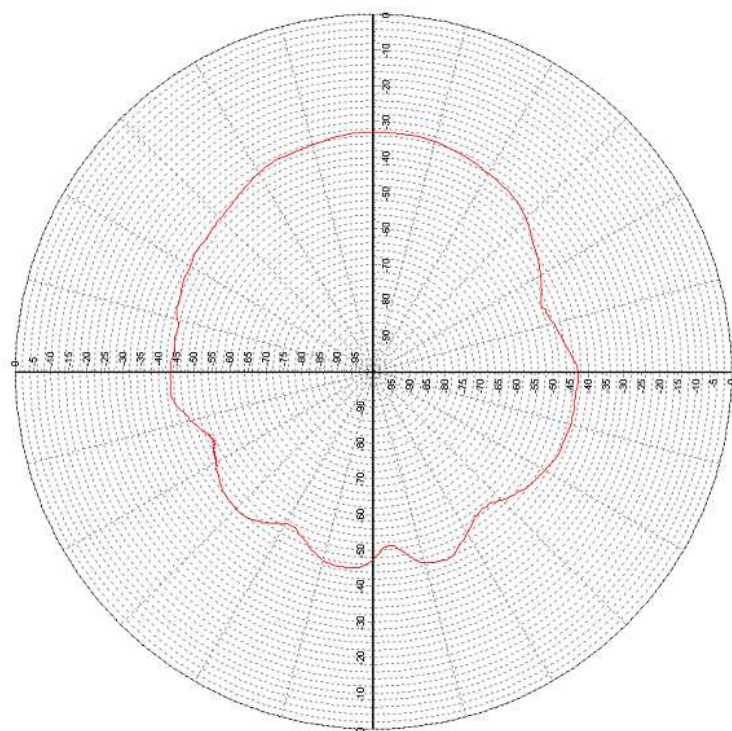
Obr. 7.13 Měřená směrová charakteristika při vertikální polarizaci rovina x-z, složka E_{θ} , $f = 2,45$ GHz.



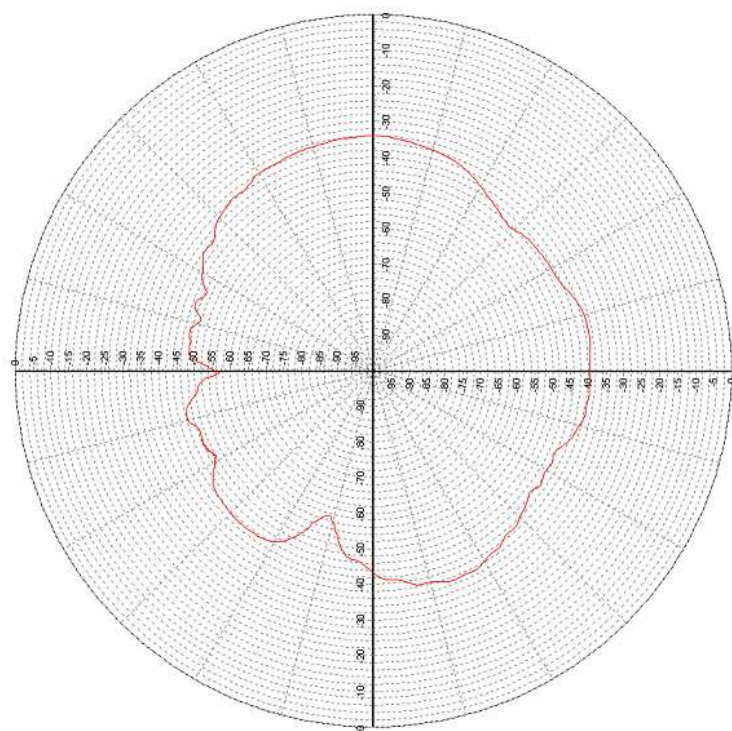
Obr. 7.14 Měřená směrová charakteristika při horizontální polarizaci rovina y-z, složka E_{ϕ} , $f = 2,45$ GHz.



Obr. 7.15 Měřená směrová charakteristika při horizontální polarizaci rovina y-z, složka E_{θ} , $f = 2,45$ GHz.



Obr. 7.16 Měřená směrová charakteristika při horizontální polarizaci rovina x-z, složka E_{ϕ} , $f = 2,45$ GHz.



Obr. 7.17 Měřená směrová charakteristika při horizontální polarizaci rovina x-z, složka E_{θ} , $f = 2,45$ GHz.

8 Porovnání výsledků

V této kapitole chci porovnat naměřené výsledky s výsledky simulačními.

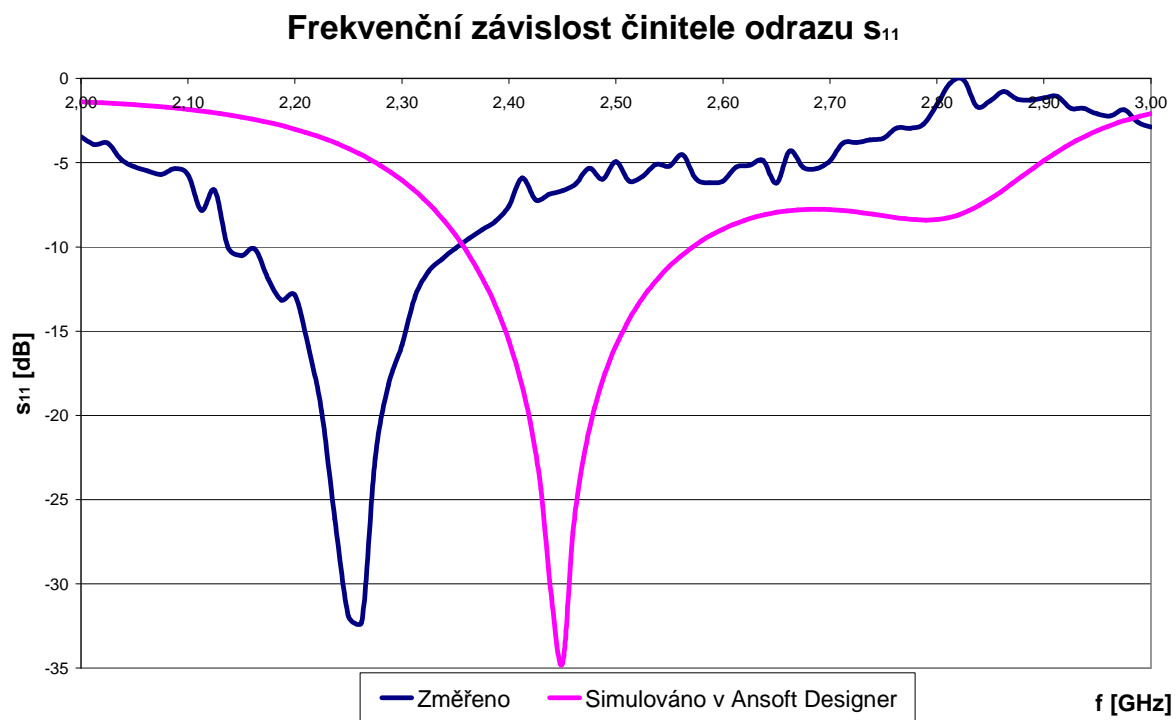
8.1. Činitel odrazu s_{11}

Již první model nasvědčoval, že simulované a měřené hodnoty činitele odrazu s_{11} se tolik neliší. Jak ukazuje obr. 8.1, anténa dosahuje výborného impedančního přizpůsobení. Simulovaná a měřená hodnota se téměř neliší - změřená hodnota činitele odrazu je $s_{11} = -32$ dB. U tohoto modelu se ovšem poměrně posunula pracovní frekvence z požadovaných 2,45 GHz na 2,26 GHz. Tato změna je nejspíše způsobena vynecháním impedančního transformátoru na vstupu antény. Tento výsledek byl prvním ověřením, že je postup návrhu správný.

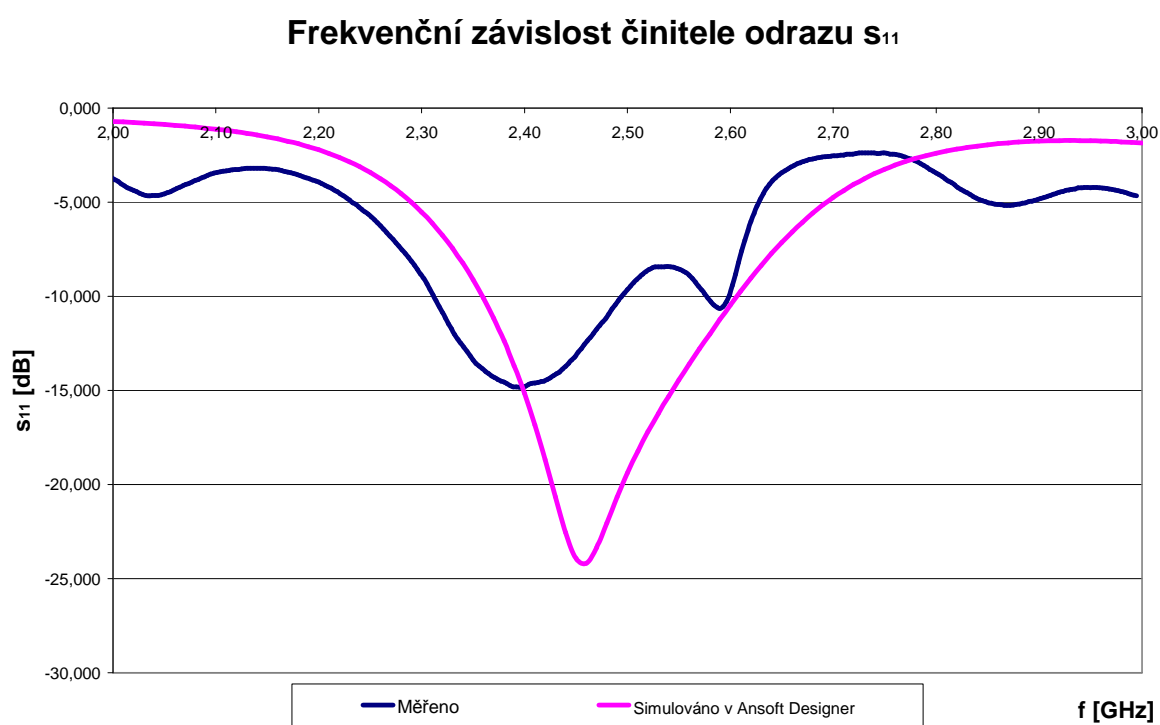
Druhý model vychází z prvního, byly však upraveny určité rozměry, jak je zobrazeno na obr. 6.9. Dále byl doplněn oddělovací kondenzátor na vstupu antény, který zabrání pronikání stejnosměrného napětí z napájecího obvodu diod na vstup antény. Před tento kondenzátor byl zařazen impedanční transformátor. Další úpravou bylo přidání tlumivek a použití co nejméně vodičů, z důvodu možného proniknutí vf. signálu do napájecího obvodu, viz obr. 7.3. Na obr. 8.2 až 8.5 jsou srovnány výsledky měření a simulace. Z grafů je patrné, že se naměřené a simulované výsledky podobají. Pro lineární horizontální a pro levotočivou kruhovou polarizaci jsou naměřené výsledky dokonce lepší než simulované. Je potřeba zdůraznit, že se u optimalizovaného modelu v podstatě neposunula pracovní frekvence (jak v simulacích, tak u měření) a anténa tak umožňuje přepínat polarizaci na téměř stejném pracovním kmitočtu. Toto zjištění je vlastně stěžejní výsledek mé práce. Pracovní kmitočet se pohybuje v rozmezí $<2,39 - 2,50>$ GHz. Přesnou pracovní frekvenci jednotlivých polarizací ukazuje tabulka č. 1. Pro levotočivou kruhovou polarizaci je pracovní frekvence přímo 2,45 GHz, lineární polarizace ve směru osy x má pracovní kmitočet 2,43 GHz. Ostatní pracovní kmitočty jednotlivých polarizací se již od hodnoty 2,45 GHz nepatrně liší.

Stav přepínače DIP		Stav PIN diod			Polarizace	Pracovní frekvence [GHz]
Port ₁	Port ₂	D ₁	D ₂	D ₃		
OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	E _y	2,39
OFF	ON	OFF	ON	ON	E _x	2,43
ON	ON	ON	ON	ON	E _{RHCP}	2,5
ON	OFF	ON	OFF	OFF	E _{LHCP}	2,45

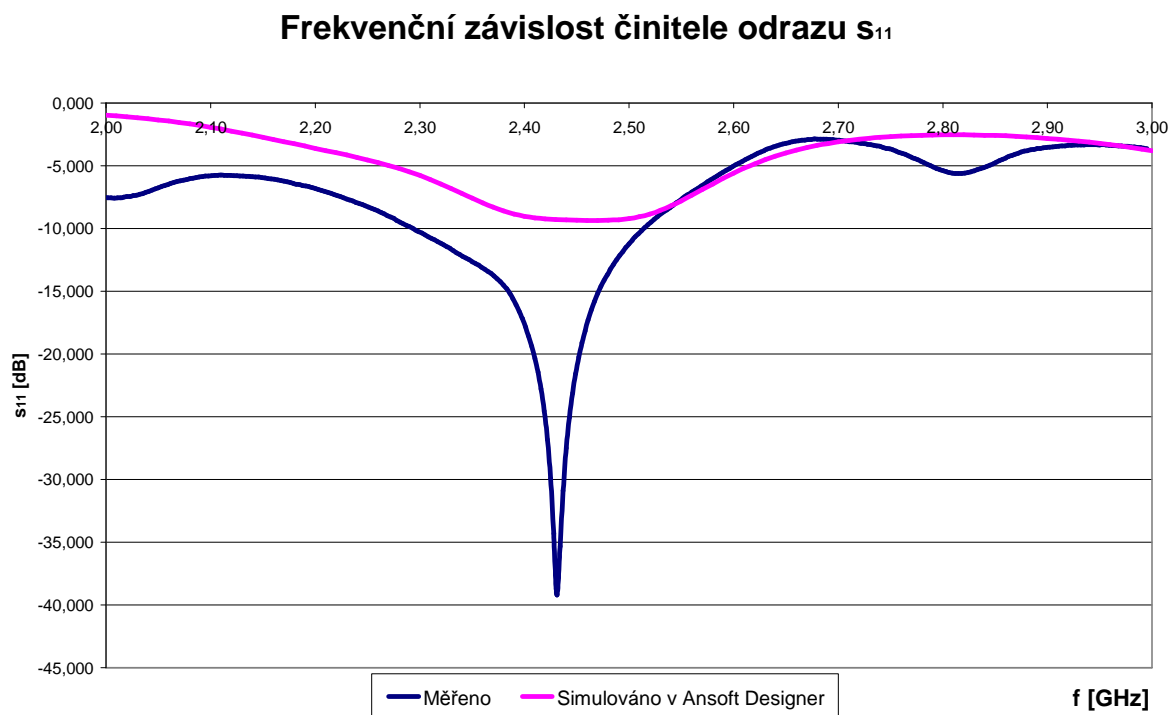
Tabulka č. 1 Stav přepínače v závislosti na polarizaci antény.



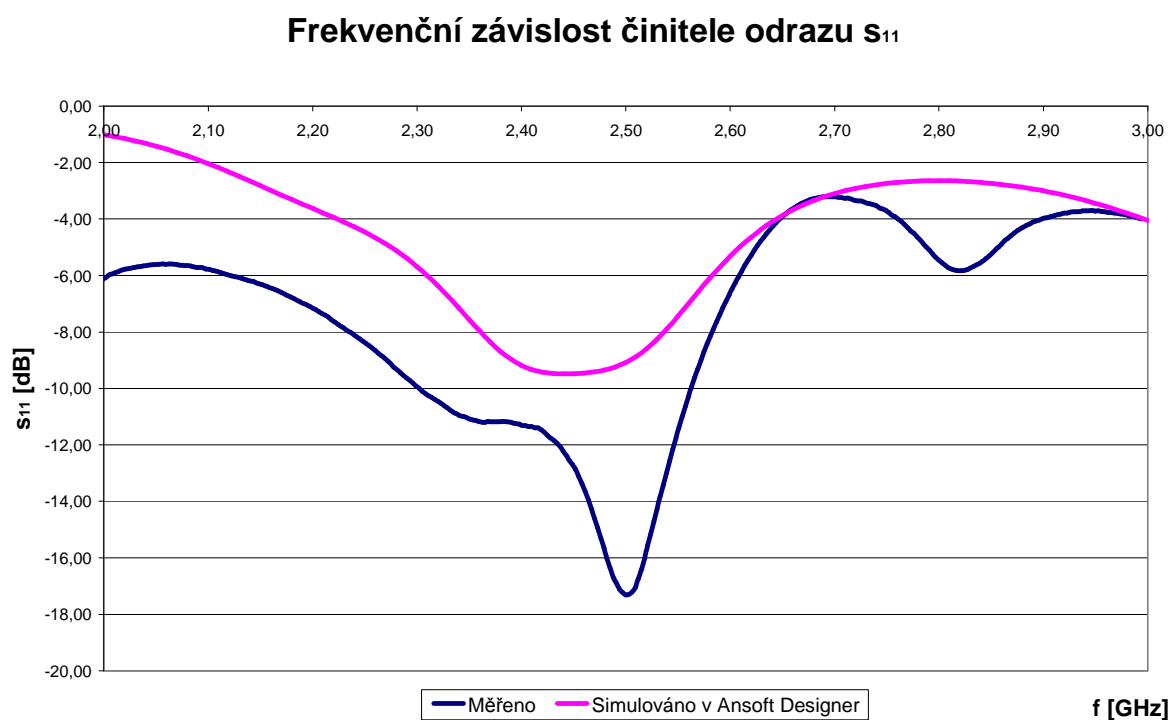
Obr. 8.1 Porovnání činitele odrazu s_{11} původního modelu při vertikální polarizaci.



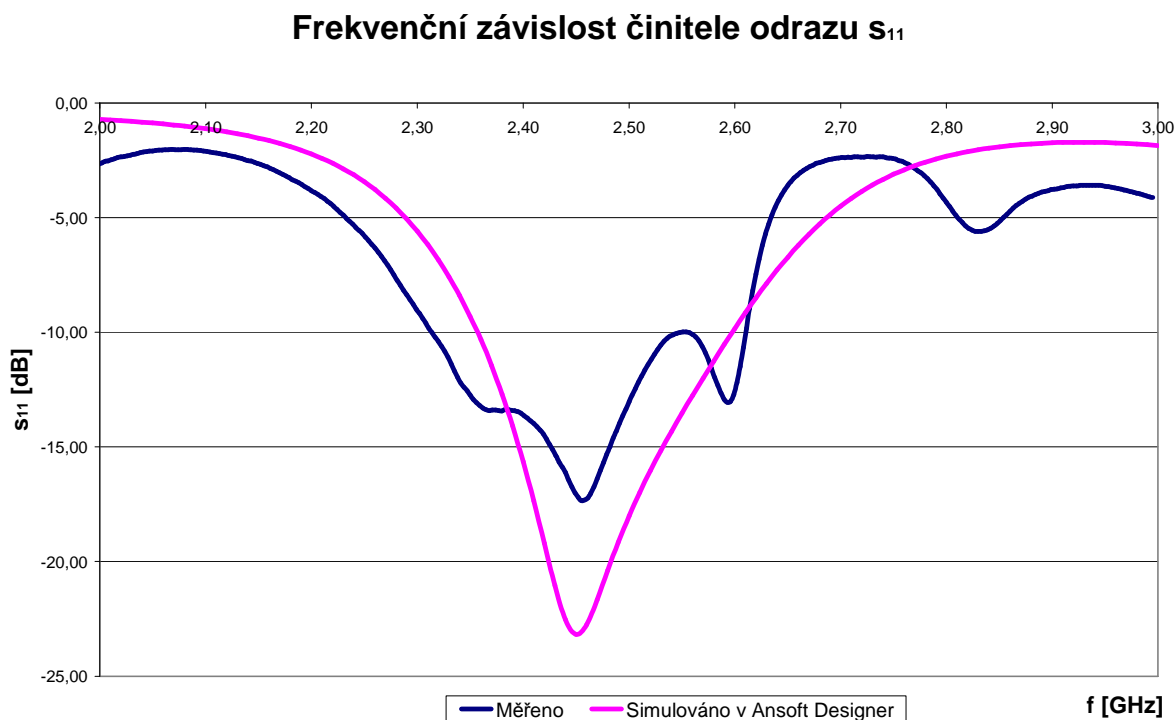
Obr. 8.2 Porovnání činitele odrazu s_{11} optimalizovaného modelu při vertikální polarizaci.



Obr. 8.3 Porovnání činitele odrazu s_{11} optimalizovaného modelu při horizontální polarizaci.



Obr. 8.4 Porovnání činitele odrazu s_{11} optimalizovaného modelu při pravotočivé kruhové polarizaci.



Obr. 8.5 Porovnání činitele odrazu s_{11} optimalizovaného modelu při levotočivé kruhové polarizaci.

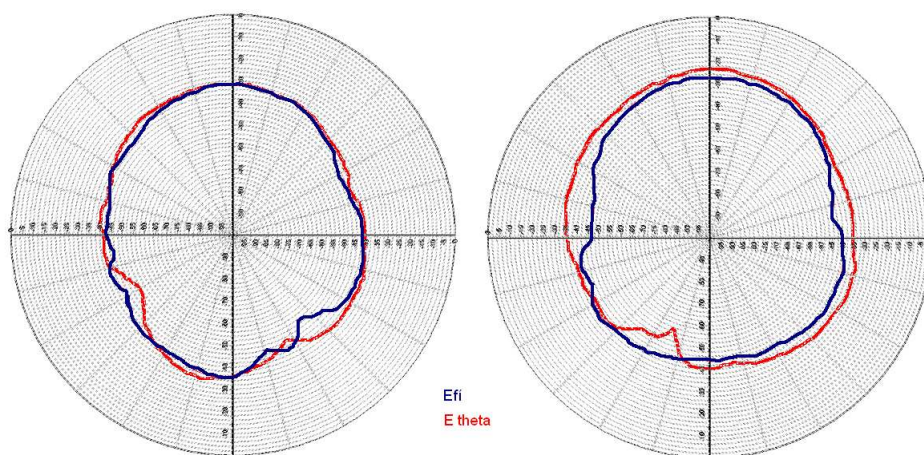
8.2. Směrové charakteristiky

Měření směrových charakteristik bylo provedeno pouze pro optimalizovaný model antény. Bohužel měření probíhala v bezodrazové komoře, jejíž provedení nebylo na takové úrovni, která by vyhovovala požadavkům daného měření.

Přijímací anténa byla s točnou spojena s datovými kabely, které nebyly pravděpodobně odstíněny, a tudíž způsobovaly poměrně velké rušení. Pokud byl vypnut generátor i točna, přijímací anténa přesto přijímala poměrně velký signál. Změřit se daly dobře přizpůsobené antény umožňující přenášet velký výkon (signál antény potom vysoce převyšuje všudypřítomný všesměrový šum). Další nevýhodou bylo provedení absorberů, které byly určeny pro měření od kmitočtu 4 GHz.

Bohužel z výsledků je patrné, že anténa vyzařuje příčnou složku skoro stejně účinně jako podélnou. Na obrázku 8.6, resp. 8.7 je zobrazeno porovnání měřených, simulovaných a převzatých (z publikace [9]) směrových charakteristik při nastavení přepínače umožňující vertikální, resp. horizontální polarizaci. Simulované charakteristiky mají určitá minima, která se u měřených nevyskytují. Ze směrových i 3D charakteristik je patrné, že anténa vyzařuje i pod flíček. To je nejspíše způsobeno tím, že je zemní deska ve vzdálenosti 5mm od vyzařujícího flíčku.

Z měření směrových charakteristik nelze jednoznačně určit, zda přepínání polarizace funguje tak, jak má. Změřené a simulované charakteristiky se tvarem sice podobají. Pokud je však srovnáme s charakteristikami převzatými z literatury, tak ty už se neshodují. Ideální by bylo proměřit model antény ještě jednou v komoře, která by vyhovovala požadavkům na měření.

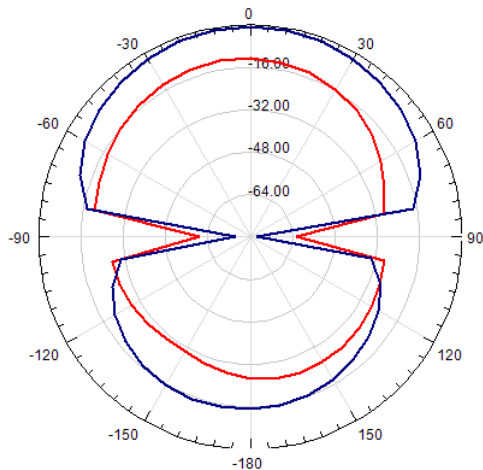


a)

Měřeno

b)

Smerová charakteristika při vertikální polarizaci

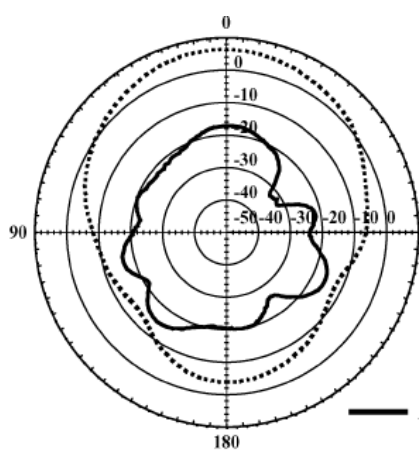
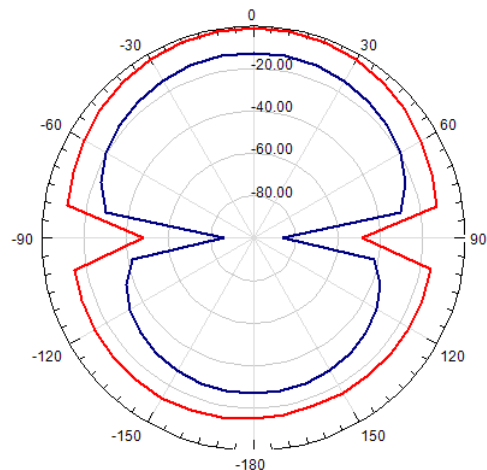


a)

Simulováno

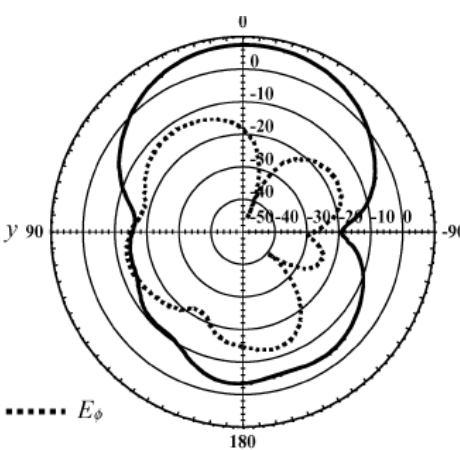
b)

Smerová charakteristika při vertikální polarizaci



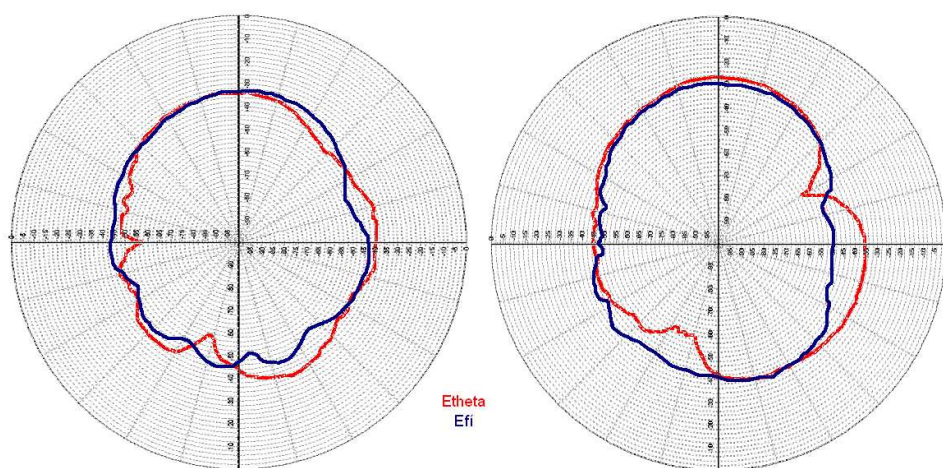
a)

Převzato z [9]



b)

Obr. 8.6 Směrová charakteristika, při nastavení přepínače na vertikální polarizaci, $f = 2,45$ GHz. a) rovina x-z b) rovina y-z.

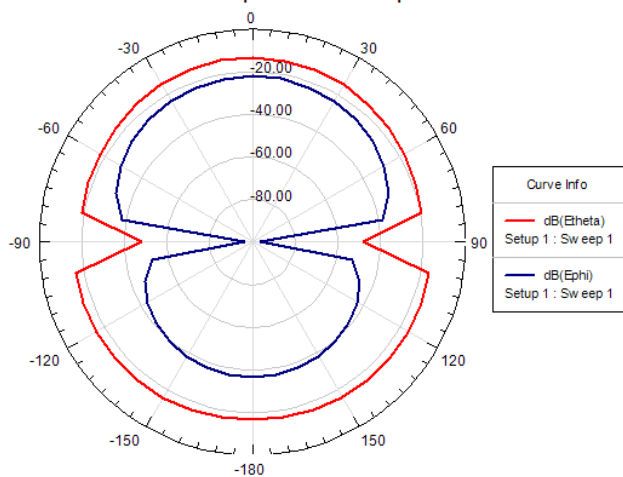


a)

Měřeno

b)

Smerová charakteristika pri horizontálnej polarizaci

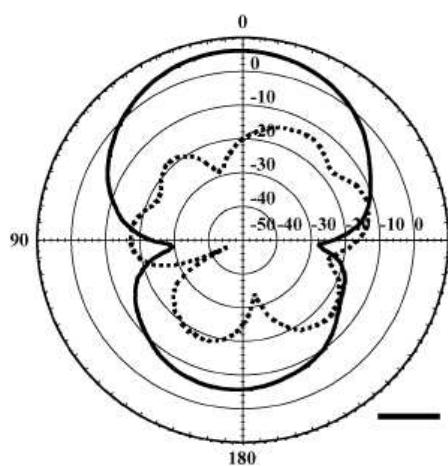
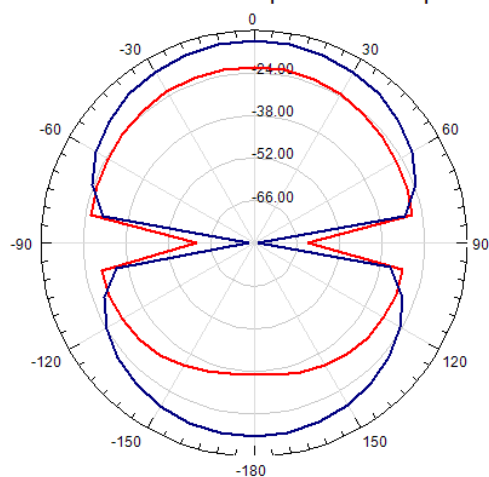


a)

Simulováno

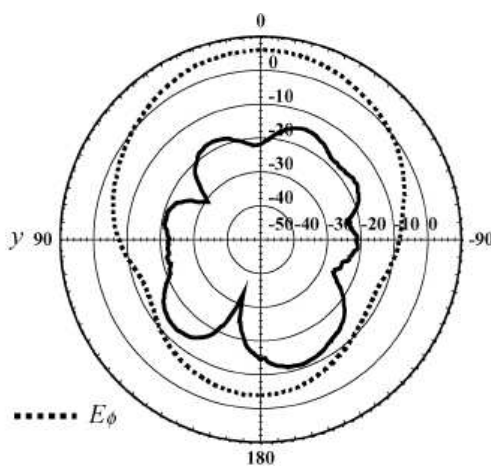
b)

Smerová charakteristika pri horizontálnej polarizaci



a)

Převzato z [9]



b)

Obr. 8.7 Směrová charakteristika, při nastavení přepínače na vertikální polarizaci, $f = 2,45$ GHz. a) rovina x-z b) rovina y-z.

9 Závěr

Tato práce se zabývá flíčkovými anténami. Seznámil jsem se se základními typy planárních antén, s metodami jejich návrhu, optimalizace a modelování v programu ANSOFT Designer. Zaměřil jsem se na návrh planárních antén s aperturovým napájením, jelikož se tyto antény konstrukcí podobají flíčkové anténě umožňující přepínat polarizaci. Detailně jsem prozkoumal a navrhl několik typů flíčkových antén s aperturovým napájením, konkrétně anténu s obdélníkovou šterbinou a s kruhovou šterbinou. Oba typy antény jsou navrženy na substrátu FR4 s relativní permitivitou $\epsilon_r = 4,4$ pro rezonanční frekvenci 2,45 GHz. Dále byla provedena parametrická analýza zkoumaných antén.

Pro anténu napájenou skrz obdélníkovou šterbinu, bylo dosaženo hodnoty činitele odrazu $s_{11} = -8,17$ dB. Z parametrické analýzy bylo zjištěno, že při zužování šířky flíčku W dochází k snižování činitele odrazu s_{11} a poklesu pracovní frekvence (při zmenšení šířky se sníží efektivní permitivita a následně se zvýší délka vlny na substrátu). Změnou délky L dojde přímo ke změně rezonanční frekvence. Parametry antény rovněž ovlivňuje napájecí mikropásek. Zkrácením jeho délky l_f snížíme rezonanční frekvenci, prodloužením l_f rezonanční frekvenci zvýšíme (vliv stojaté vlny na mikropásku). Při jakékoli změně velikosti l_f dojde k nepatrnému zhoršení impedančního přizpůsobení. Změnou šířky napájecího mikropásku měníme jeho charakteristickou impedanci, a tedy zvyšujeme nebo snižujeme hodnotu činitele odrazu s_{11} . Posledními zkoumanými parametry byly rozměry šterbiny v zemní desce. Změnou výšky šterbiny w_a dojde k posunu rezonanční frekvence a ke změně impedančního přizpůsobení antény. Zkrácením délky šterbiny l_a zvýšíme rezonanční frekvenci a zvýší se hodnota s_{11} . Prodloužením šterbiny zvýšíme rezonanční frekvenci a snížíme hodnotu s_{11} . Při posunu celé šterbiny směrem dolů se zvýší s_{11} .

Podobně jako předchozí model byla zkoumána i anténa s kruhovou šterbinou. Tato anténa vycházela z [9]. Bylo dosaženo velmi dobré hodnoty impedančního přizpůsobení, a to $s_{11} = -31,90$ dB. Ze závislosti činitele odrazu s_{11} na změně poloměru vyzařovacího flíčku R vyplývá, že při zvětšování poloměru dochází ke snížení rezonanční frekvence a zhoršení impedančního přizpůsobení. Naopak při zmenšení poloměru dojde ke zvýšení rezonanční frekvence a k zlepšení přizpůsobení. Poloměr kruhové šterbiny r měl na vlastnosti antény následující vliv: zvětšení r sníží rezonanční frekvenci a naopak. Hodnota činitele odrazu s_{11} zůstává přibližně stejná. Co se týká délky napájecího mikropásku, při jakékoli změně dojde ke zhoršení impedančního přizpůsobení.

Poslední anténou, kterou se tato práce zabývá, byla anténa umožňující přepínat polarizaci mezi lineární polarizací a kruhovou. Konkrétně mezi vertikální, horizontální, pravotočivou a levotočivou polarizací. Tato anténa vycházela z modelu s kruhovou šterbinou. Z důvodu horší dostupnosti substrátu FR4 ve školní dílně, byl nakonec použit substrát Arlon 25N o výšce $h = 1,54$ mm s relativní permitivitou $\epsilon_r = 3,38$. Aby anténa umožnila přepínat polarizaci, bylo nutné model doplnit třemi PIN diodami HSMP 3810, jejichž výrobcem je AVAGO Technologies, a napájecím obvodem skládajícím se z 3-V lithiové baterie, přepínače DIP. Tato anténa byla nejen optimalizovaná jako ostatní v programu Ansoft Desinger, ale také vyrobena ve školní dílně UREL.

Měření modulu činitele odrazu bylo provedeno laboratoř č. 737 pomocí vektorového analyzátoru RHODE&SCHWARZ ZVL 6. Naměřené a simulované výsledky se podobají. Pro lineární horizontální a pro levotočivou kruhovou polarizaci jsou naměřené výsledky dokonce lepší než simulované. Je potřeba zdůraznit, že se u optimalizovaného modelu v podstatě neposunula pracovní frekvence a anténa tak umožňuje přepínat polarizaci na téměř

stejném pracovním kmitočtu. Toto zjištění je vlastně stěžejní výsledek mé práce. Pracovní kmitočet se pohybuje v rozmezí $<2,39 - 2,50>$ GHz.

Měření směrových charakteristik proběhlo na katedře radiolokace Univerzity obrany ČR v bezodrazové komoře. Bylo provedeno pouze pro optimalizovaný model antény. Bohužel měření probíhala v bezodrazové komoře, jejíž provedení nebylo na takové úrovni, která by vyhovovala požadavkům daného měření. Z výsledků je patrné, že anténa vyzařuje příčnou složku skoro stejně účinně jako podélnou. Simulované charakteristiky mají určitá minima, která se u měřených nevyskytují. Ze směrových i 3D charakteristik je patrné, že anténa vyzařuje i pod flíček. To je nejspíše způsobeno umístěním zemní desky ve vzdálenosti 5 mm od vyzařujícího flíčku.

Z měření směrových charakteristik nelze jednoznačně určit, zda přepínání polarizace funguje tak jak má. Změřené a simulované charakteristiky se tvarem sice podobají. Pokud je však srovnáme s charakteristikami převzatými z literatury, tak ty už se neshodují. Ideální by bylo proměřit model antény ještě jednou v komoře, která by vyhovovala požadavkům na měření.

10 Literatura

- [1] <http://www.quido.cz/Objevy/rozhlas1.htm>
- [2] <http://cs.wikipedia.org/wiki>
- [3] RAIDA, Z. a kol. *Analýza mikrovlnných struktur v časové oblasti*. Brno: VUTIUM 2004.
- [4] RAIDA, Z. *Počítačové řešení komunikačních systémů. Elektronické skriptum*. Brno: FEKT VUT v Brně, 2006.
- [5] RAIDA, Z. *Počítačové řešení komunikačních systémů – přednášky* [online]. Dostupné na: <http://www.feec.vutbr.cz/~raida>
- [6] ČERNOHORSKÝ, D., RAIDA, Z., ŠKVOR, Z., NOVÁČEK, Z. *Analýza a optimalizace mikrovlnných struktur*. Brno: VUTIUM, 1999.
- [7] NOVÁČEK, Z. *Elektromagnetické vlny, antény a vedení. Elektronické skriptum*. Brno: FEKT, VUT v Brně, 2006.
- [8] BALANIS, C. A. *Antenna Theory: Analysis and Design*, 3rd Edition. New York: J. Wiley and Sons, 2005.
- [9] CHEN, R.H., ROW, J.S. *Single-fed microstrip patch antenna with switchable polarization*. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2008, vol. 56, no. 4, p. 922-926.
- [10] MILLIGAN, T. A. *Modern antenna design*. 2nd Edition, Piscataway: IEEE Press, 2005.
- [11] ROW, J. S., WU, J. F. *Aperture-coupled microstrip antennas with switchable polarization*, IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 54, pp. 2686–2691, Sep. 2006.
- [12] ROW, J. S., CHEN, R. H. *Reconfigurable slot-coupled microstrip antenna with polarisation diversity*. IET Microw. Antennas Propag., vol. 1, pp. 798–802, Jun. 2007
- [13] ROW, J. S. *Design of aperture-coupled annular-ring microstrip antennas for circular polarization*, IEEE Trans. Antennas and Propagation, Volume 53, page 1779-1784, May 2005

11 Seznam zkratek a symbolů

λ	délka vlny
W	šířka flíčku
L	délka flíčku
w	šířka mikropásku
ε_f	efektivní permitivita
ε_r	relativní permitivita
f_r	pracovní kmitočet
h	výška substrátu
λ_d	délka vlny v substrátu
c	rychlost světla ve vakuu

12 Seznam obrázků

Obr. 2.1 Flíčková anténa napájena: a) mikropáskem b) koaxiální sondou.....	10
Obr. 2.2 Struktura aperturově napájené antény.....	11
Obr. 2.3 Pohled na aperturově buzenou flíčkovou anténu „shora“.....	12
Obr. 3.1 Hlavní okno programu Ansoft Designer.....	13
Obr. 3.2 Záložka Stack up pro úpravu substrátu.....	14
Obr. 4.1 Menu pro nastavení parametrů analýzy.....	16
Obr. 4.2 Menu pro sestavení grafu.....	16
Obr. 4.3 Kmitočtová závislost činitele odrazu s_{11}	17
Obr. 4.4 Trojrozměrné zobrazení flíčkové antény s aperturovým napájením.....	17
Obr. 4.5 Rozměry aperturově buzené antény.	18
Obr. 4.6 Frekvenční závislost činitele odrazu s_{11} při změně šířky flíčku W	19
Obr. 4.7 Frekvenční závislost činitele odrazu s_{11} při změně délky flíčku L	19
Obr. 4.8 Frekvenční závislost činitele odrazu s_{11} při změně výšky nap. mikropásku l_f	20
Obr. 4.9 Frekvenční závislost činitele odrazu s_{11} při změně šířky nap. mikropásku w	20
Obr. 4.10 Frekvenční závislost činitele odrazu s_{11} při změně výšky šterbiny w_a	21
Obr. 4.11 Frekvenční závislost činitele odrazu s_{11} při změně v délky šterbiny l_a	21
Obr. 5.1 Rozměry antény.	22
Obr. 5.2 Zadání jednotlivých vrstev substrátu.	23
Obr. 5.3 Rozložení vrstev flíčkové antény.	23
Obr. 5.4 Motiv antény v programu Ansoft Designer.....	23
Obr. 5.5 Menu pro nastavení parametrů analýzy.	24
Obr. 5.6 Závislost činitele odrazu s_{11} na frekvenci.	24
Obr. 5.7 Trojrozměrné zobrazení antény.	24
Obr. 5.8 Skutečné rozměry antény.	25
Obr. 5.9 Frekvenční závislost činitele odrazu s_{11} při změně poloměru flíčku R	25
Obr. 5.10 Frekvenční závislost činitele odrazu s_{11} při změně poloměru šterbiny r	26
Obr. 5.11 Frekvenční závislost činitele odrazu s_{11} při změně délky h nap. mikropásku.....	26
Obr. 6.1 Rozměry antény s přepínatelnou polarizací.....	27
Obr. 6.2 Změna použitého substrátu.....	28
Obr. 6.3 Motiv antény.....	29
Obr. 6.4 Postup nakonfigurování knihovny.....	30
Obr. 6.5 Výběr diody	30
Obr. 6.6 Simulované výsledky antény pracující ve dvou LP režimech.....	32
Obr. 6.7 Simulované výsledky antény pracující ve dvou CP režimech.....	32

Obr. 6.8 Simulované výsledky závislosti elipticity na frekvenci.....	33
Obr. 6.9 Optimalizované rozměry antény.	34
Obr. 6.10 Simulované výsledky antény pracující ve dvou LP režimech opt. modelu.....	34
Obr. 6.11 Simulované výsledky antény pracující ve dvou CP režimech opt. modelu.....	35
Obr. 6.12 Simulované výsledky závislosti elipticity na frekvenci pro opt. model.....	35
Obr. 6.13 Směrová charakteristika, při nastavení přepínače na vertikální polarizaci, $f = 2,45$ GHz. a) rovina x-z b) rovina y-z.....	36
Obr. 6.14 3D směrová charakteristika při nastavení přepínače na vertikální polarizaci, $f = 2,45$ GHz.	36
Obr. 6.15 Směrová charakteristika, při nastavení přepínače na horizontální polarizaci, $f = 2,45$ GHz. a) rovina x-z b) rovina y-z.....	37
Obr. 6.16 3D směrová charakteristika při nastavení přepínače na horizontální polarizaci, $f = 2,45$ GHz.	37
Obr. 7.1 Fotografie kompletního původního modelu: a) přední strana b) zadní strana.....	38
Obr. 7.2 Fotografie kompletního optimalizovaného modelu: a)přední strana b)zadní strana.....	38
Obr. 7.3 Činitel odrazu s_{11} původního modelu při vertikální polarizaci.	39
Obr. 7.4 Činitel odrazu s_{11} optimalizovaného modelu při vertikální polarizaci.	40
Obr. 7.5 Činitel odrazu s_{11} optimalizovaného modelu při horizontální polarizaci.	40
Obr. 7.6 Činitel odrazu s_{11} optimalizovaného modelu při pravotočivé kruhové polarizaci....	41
Obr. 7.7 Činitel odrazu s_{11} optimalizovaného modelu při levotočivé kruhové polarizaci.....	41
Obr. 7.9 Schéma pracoviště pro měření směrových charakteristik.....	42
Obr. 7.9 Umístění měřené antény v bezodrazové komoře.	42
Obr. 7.10 Měřená směrová charakteristika při vertikální polarizaci rovina y-z, složka E_{ϕ} , $f = 2,45$ GHz.....	43
Obr. 7.11 Měřená směrová charakteristika při vertikální polarizaci rovina y-z, složka E_{θ} , $f = 2,45$ GHz.	43
Obr. 7.12 Měřená směrová charakteristika při vertikální polarizaci rovina x-z, složka E_{ϕ} , $f = 2,45$ GHz.....	44
Obr. 7.13 Měřená směrová charakteristika při vertikální polarizaci rovina x-z, složka E_{θ} , $f = 2,45$ GHz.	44
Obr. 7.14 Měřená směrová charakteristika při horizontální polarizaci rovina y-z, složka E_{ϕ} , $f = 2,45$ GHz.	45
Obr. 7.15 Měřená směrová charakteristika při horizontální polarizaci rovina y-z, složka E_{θ} , $f = 2,45$ GHz.....	45

Obr. 7.16 Měřená směrová charakteristika při horizontální polarizaci rovina x-z, složka E_{ϕ} , $f = 2,45$ GHz.	46
Obr. 7.17 Měřená směrová charakteristika při horizontální polarizaci rovina x-z, složka E_{θ} , $f = 2,45$ GHz.	46
Obr. 8.1 Porovnání činitele odrazu s_{11} původního modelu při vertikální polarizaci.....	48
Obr. 8.2 Porovnání činitele odrazu s_{11} opt. modelu při vertikální polarizaci.....	48
Obr. 8.3 Porovnání činitele odrazu s_{11} opt. modelu při horizontální polarizaci.....	49
Obr. 8.4 Porovnání činitele odrazu s_{11} opt. modelu při pravotočivé kruhové polarizaci.....	49
Obr. 8.5 Činitel odrazu s_{11} optimalizovaného modelu při levotočivé kruhové polarizaci.....	50
Obr. 8.6 Směrová charakteristika, při nastavení přepínače na vertikální polarizaci, $f = 2,45$ GHz. a) rovina x-z b) rovina y-z	51
Obr. 8.7 Směrová charakteristika, při nastavení přepínače na vertikální polarizaci, $f = 2,45$ GHz. a) rovina x-z b) rovina y-z.....	52

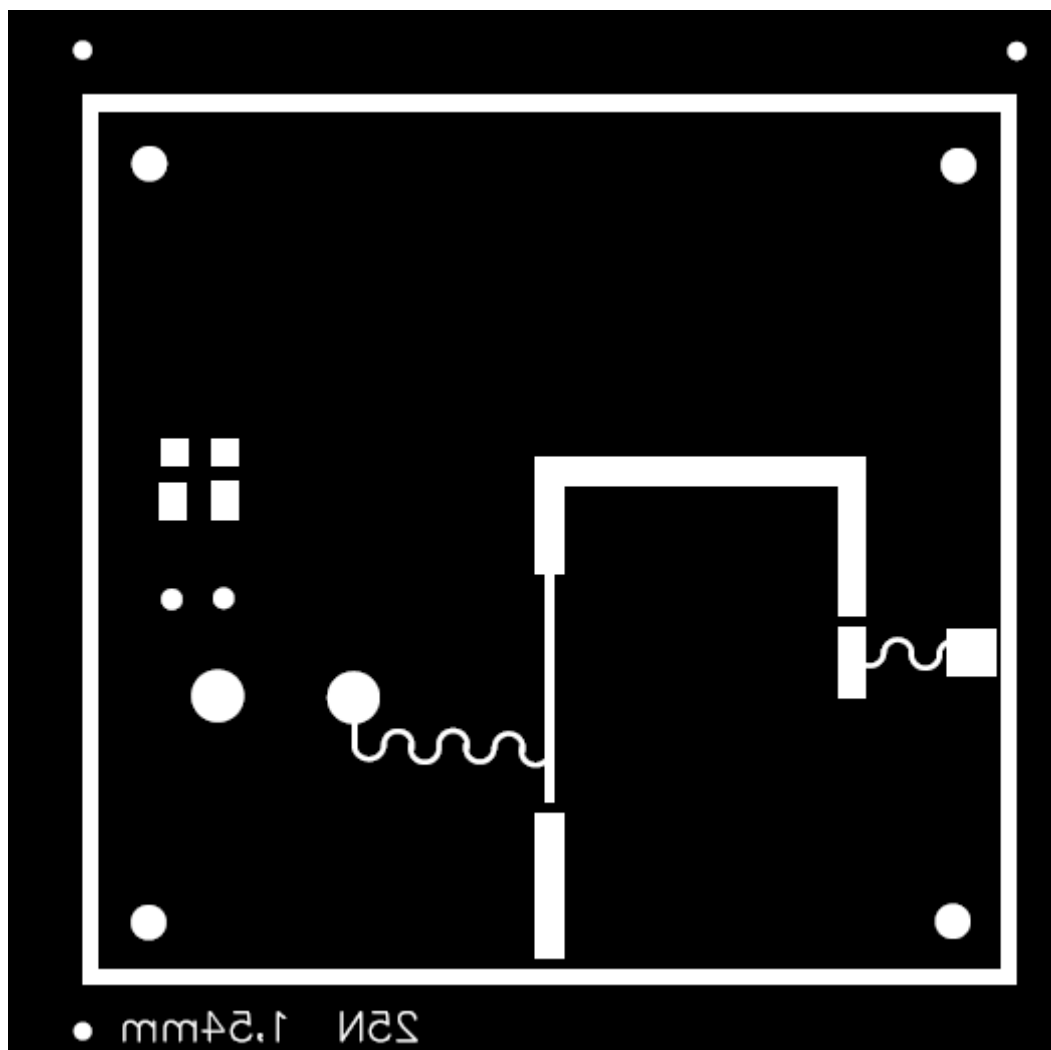
13 Přílohy

Součástí bakalářské práce je CD ROM obsahující kompletní dokumentaci bakalářské práce:

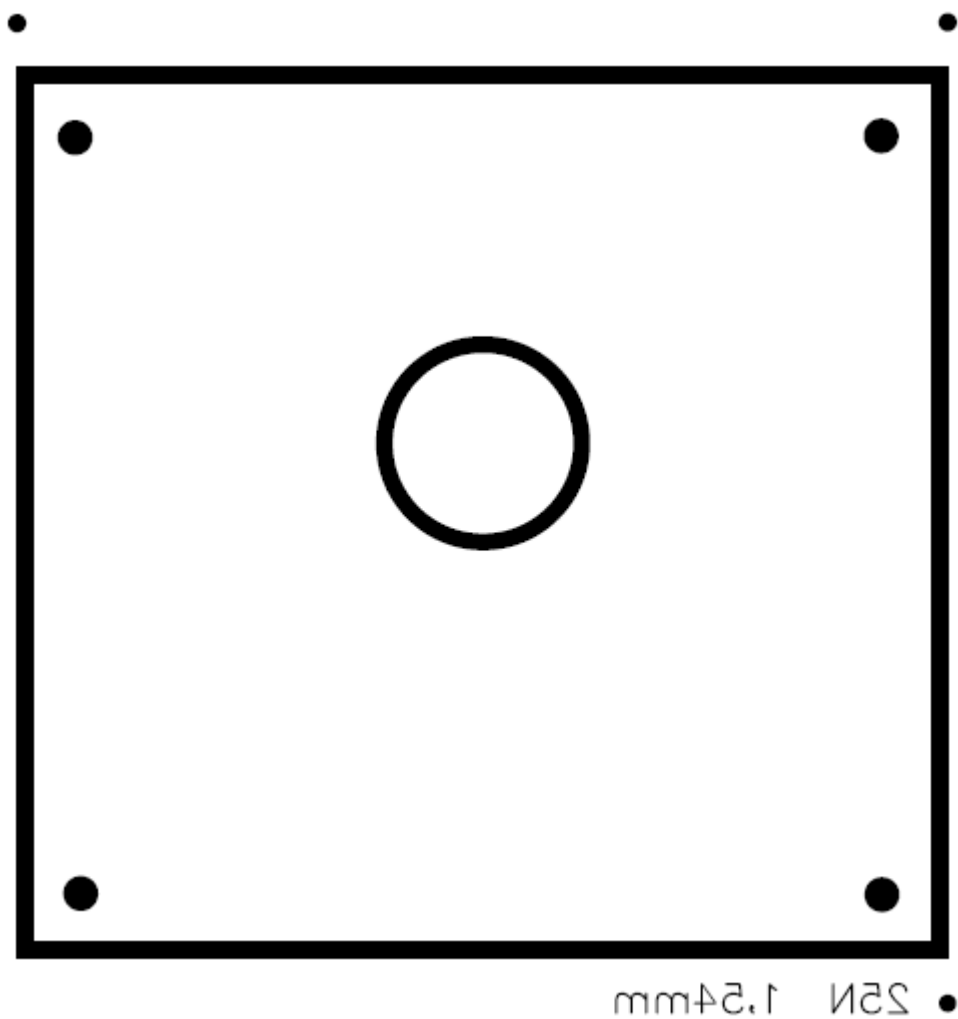
- Úvodní stránky *.doc a *.pdf:
 - desky,
 - zadání,
 - poděkování a prohlášení o původnosti,
 - licenční smlouva,
 - prohlášení a shodě tištěné a elektronické verze,
 - abstrakt, anotace a bibliografická citace
- Bakalářská práce.doc a .pdf – kompletní text bakalářské práce
- Výsledky měření laboratoř č. 737
- Výsledky měření na katedře radiolokace Univerzity obrany ČR
- Zdrojové soubory antén v programu Ansoft Designer
- Předlohy pro výrobu ve formátu *.pdf a *.ger

Příloha 1, Předloha pro výrobu antény metodou DPS

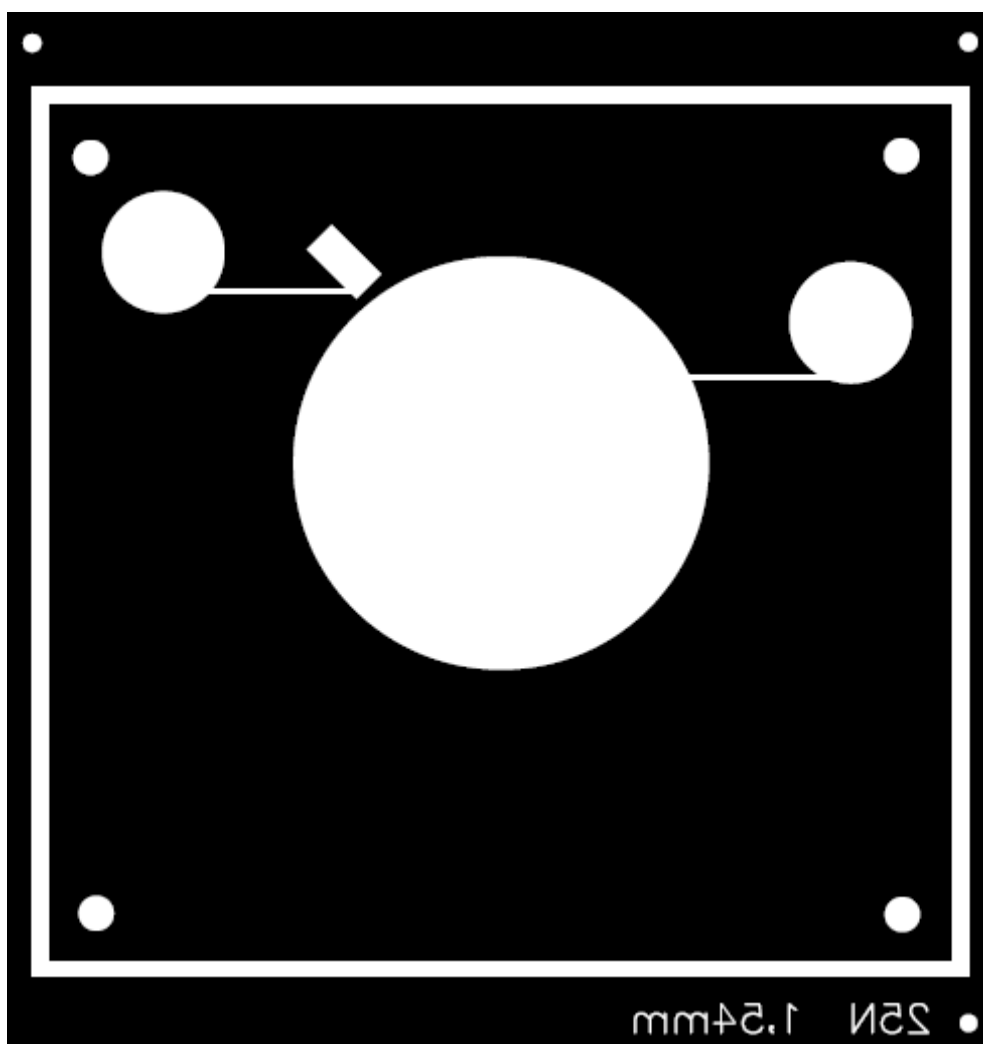
Příloha 1



Obr 13.1 *Předloha pro výrobu antény metodou plošných spojů – napájecí mikropásek
M 1:1*



Obr. 13.2 *Předloha pro výrobu antény metodou plošných spojů – štěrba M 1:1.*



Obr. 13.3 Předloha pro výrobu antény metodou plošných spojů – vyzařovací flíček
M 1:1.